

جمهوری اسلامی ایران

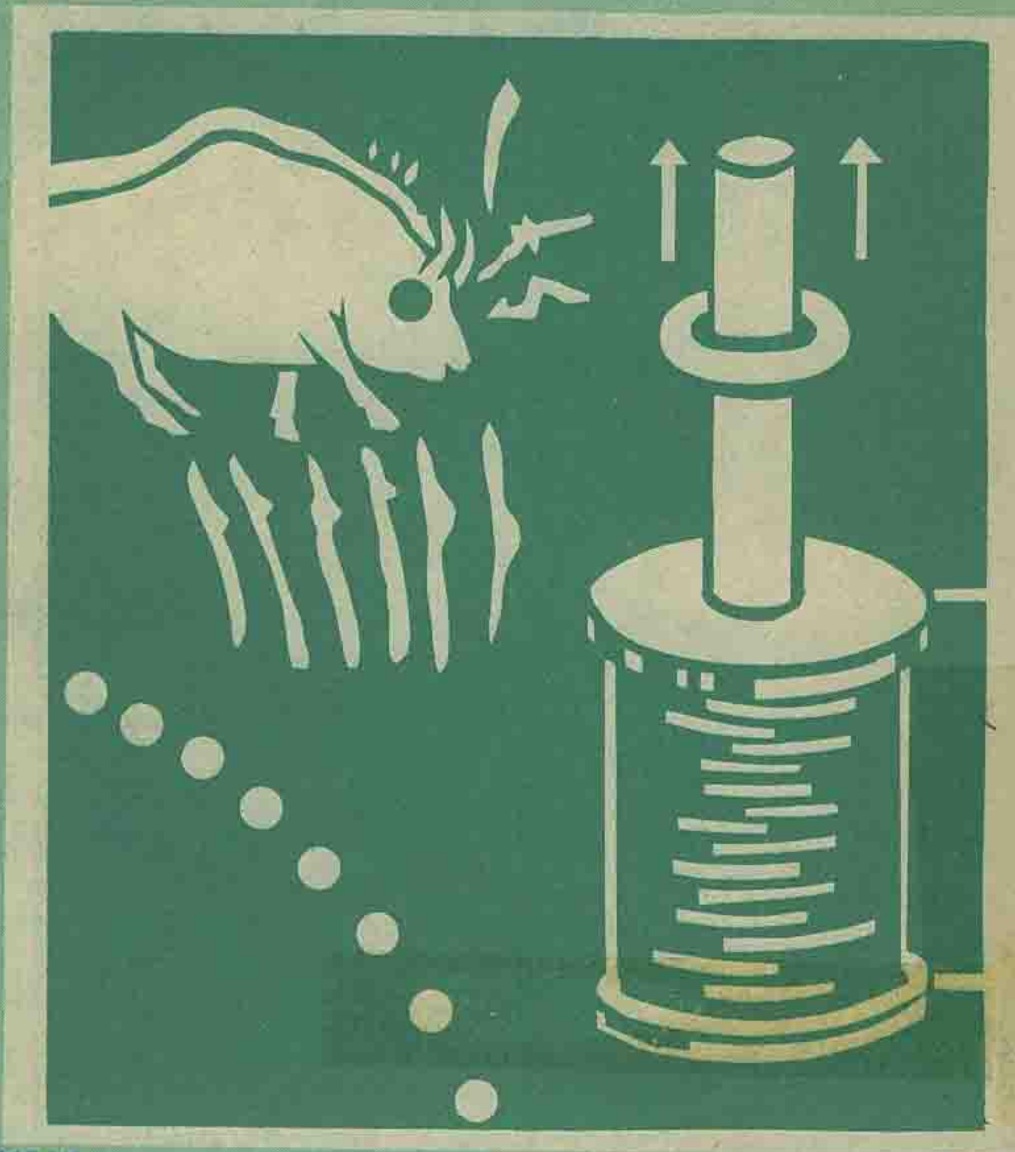
وزارت آموزش و پرورش

فیزیک

سال چهارم

آموزش متوسطهٔ عمومی

ریاضی و فیزیک



۲۹۳

بسم الله الرحمن الرحیم

فیزیک

سال چهارم

آموزش متوسطه عمومی

ریاضی و فیزیک

پدیدآورندگان

مؤلفان: • ابوالقاسم قلمسیاه • محمدعلی پیغامی

کارشناس سازمان کتابهای درسی: اسفندیار معتمدی

صفحه پرداز: حسن فخارزاده

رسام: خسرو مدیریان

چاپ از: شرکت چاپ افست گلشن

۱۳۶۰

فهرست

۱

دورنمای فیزیك

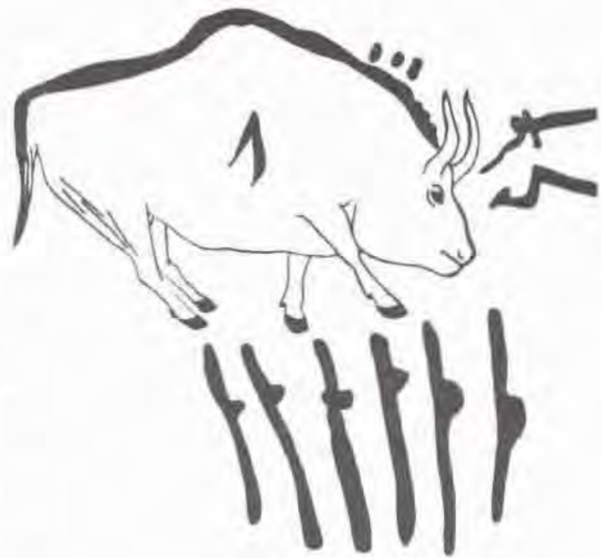
واقعیتها ـ قانون ـ تئوری

چه خوب بود که می‌توانستیم فیزیك را دریك جمله کوتاه تعریف‌کنیم ، ولی پیدا کردن جمله‌ای‌که بتواند این دانش راتعریف کند کارمشکلی است ، تاآنجاکه در تعریف فیزیك گفته‌اند : «فیزیك چیزی است که فیزیك‌دان انجام می‌دهد ! » ما بدون این‌که این تعریف طنزآمیزرا ردکنیم دراین بخش موضوعهائی‌را مطرح می‌کنیم که فیزیك‌دانان با آنها سروکار دارند .

شما در سه سال گذشته تحت عنوان درس فیزیك با پاره‌ای از پدیده‌های فیزیکی کم‌وبیش آشنا شده‌اید . با برداشتی‌که اکنون از دانش فیزیك دارید بهتر می‌توانیم علاوه برآنچه که با این دانش ارتباط دارد ، مسائلی راکه فیزیك‌دانان باآنها روبرو هستند و فنونی را که بکار می‌برند شرح دهیم و سادگی و زیبائی ویژه‌ای را که دانش فیزیك ازآن برخوردار است جلوه‌گر سازیم .

فیزیك چیست ؟ ـ یکی از ویژگیهای بارز انسان از دوران پیش ازتاریخ تاکنون ، حس‌کنجکاوی او درپی بردن به‌رازهای نهفته طبیعت است. انسان حتی پیش از اختراع خط ، احساس خود را ازطبیعت به صورت نقش ونگار به یادگار گذاشته است . از میان برجسته‌ترین این گونه‌آثار ، شاید بتوان نقوش حیوانهای عصریخبندان را نام بردکه دربرخی از غارهای فرانسه واسپانیاکشف شده‌اند . این‌نقشها ، دوازده هزار تا هفده هزار سال قدمت دارند ونشان می‌دهند که نقش‌کنندگان آنها اطلاعات وسیعی در بارهٔ حیوانها داشته‌اند وقانونهائی را که حاکم بر هنرتجسمی است می‌دانسته‌اند. مدارك واقعی دیگری مانند بناهای‌سنگی‌که قدمت‌آنها به دوهزارسال پیش از میلاد مسیح می‌رسد و همچنین آثار دیگری از تمدنهای قدیمی وجود داردکه نشان می‌دهندانسان درآن دوره پاره‌ای از پدیده‌های طبیعت راکه تنوع قابل‌توجهی داشته‌اند درك کرده‌است .

علم ازنیازمندیهای عملی‌که بستگی با مسائل روزمره دارند مایه گرفته‌است . به‌کمك علوم‌تجربی است‌که انسان توانسته‌است پدیده‌های زیادی را در جهان‌هستی کشف کند: ستارگان را دسته‌بندی نماید و جرمها و مواد تشکیل دهنده و فواصل و سرعتهای



شکل ۱-۱- گاو وحشی و وسائل شکار
نمونه‌ای از نقاشی که درغار پیندال دراسپانیا کشف شده است . دراسپانیا دست‌کم ۶۳ غار یافت می‌شود که درآنها نقاشیهائی ازعصر یخبندان دیده می‌شود .

حرکت آنها را برآورد کند . موجودات زنده را رده‌بندی نماید و به‌روابط ژنتیکی آنها پی ببرد . بلورهای مواد معدنی و ترکیبات بیوشیمی و عناصر تازه‌ای را از راه سنتز به‌دست‌آورد . به ساختمان اتم پی‌ببرد. بعضی ازذرات بنیادی را درآزمایشگاه تولید کند به‌کرات آسمانی سفرنماید و ...... این پیشرفت بزرگ دانش تجربی مدیون تلاش‌مردمانی باخصایص اخلاقی بسیارمتفاوت است که‌شرافتمندانه کارکرده‌اند ونتایج کارهای خودرا به‌صورتی منتشر ساخته و دراختیار دیگران گذارده‌اند .

کلمهٔ فیزیك از ریشه یونانی « Physis » گرفته شده است و پاره‌ای ازاصلاحات جدید مانند فیزیولژی ، فیزیکال و فیزیسین از این ریشه مشتق شده‌اند و Physis در اصل به‌معنای رشد یاپیشرفت موجودهای زنده است . ولی چون انسان کم‌کم پی‌برد که رشد یا پیشرفت موجودات از الگوها و نمونه‌های معینی پیروی می‌کند این کلمه به معنای قاعده نمو یا پیشرفت گرفته شد . بنابراین فیزیك معنائی درست شبیه به‌آنچه ما اکنون آن را «قانون طبیعت» می‌نامیم به‌خودگرفت . در حدود ۲۵۰۰ سال‌پیش ، علم در یونان پیشرفت قابل توجهی در-خور آن زمان‌کرده بود وتعداد زیادی از قانونهای طبیعت کشف شده بود . درفیزیك ، شاید مهمترین کشفهای یونانیان توسط ارشمیدس (۲۱۲-۲۸۷ پیش‌ازمیلاد مسیح) صورت‌گرفت . اودو رشته از مکانیك را پدیدآورد وماشینهائی را اختراع‌کردکه دردفاع ازاقامتگاهش سیراکیوز واقع درسیسیل نقش مؤثری داشتند .

به‌دنبال این عصرطلائی یونان ،علم دراروپا وارد دوره‌ای شدکه وضع رکود به‌خودگرفت و بجزچند مورد استثنائی قابل ذکر تا دوره رنسانس (قرن شانزدهم‌میلادی) تحرك محسوسی نداشت . پیشرفت سریع علم از این دوره آغاز شد. در دوره‌ای که اروپا گرفتار رکودعلمی شدمشعل‌پرفروغ علم دردست مسلمانان بود. مسلمین نه تنها خزاین علمی دنیای کهن را از خطرنابودی نجات دادند بلکه مقدار زیادی بر ذخایرآنها نیز افزودند از قرن هشتم تا قرن یازدهم میلادی (مقارن قرن دوم تا قرن‌پنجم‌هجری)دانشمندان زیادی دراغلب رشته‌های علمی مانند پزشکی، نجوم، ریاضیات، فیزیك و شیمی (کیمیاگری) وغیره در کشورهای اسلامی از جمله کشورمان به تتبع و تحقیق پرداختند. بزرگترین فیزیکدان دنیای‌اسلام‌آن زمان حسن‌بن‌هیثم(۹۶۵-۱۰۳۹م) معروف به‌الحسن است که کتاب او درباره نور به نام المناظر مشهور است. این کتاب به لاتینی و زبانهای دیگر اروپایی ترجمه شده و مورد استفاده محققین اروپایی از جمله

کپلر بوده‌است. مؤلف در این کتاب درباره بازتابش و شکست نور به تحقیق پرداخته و تصویر در آینه‌های کروی‌را مورد بحث‌قرارداده است و برای نخستین‌بار توصیف درستی ازساختمان چشم به‌دست داده است. اطلاعات علمی مسلمانان درباره جرّاثقال نیز کامل بوده است.

خدمت مسلمانان به‌پیشرفت علم نه‌تنها از راه تحقیق واکتشاف بود بلکه باانتشار کتب ودایرکردن دانشگاههای متعدد در بلاد اسلامی پیشرفتهای خود را در بیشتر زمینه‌های علمی اشاعه دادند و اروپائیان برای رهایی از خمودگی علمی قرون وسطایی‌شروع به ترجمه‌آثار علمی مسلمانان‌که اغلب به‌زبان عربی نوشته شده بودکردند وجوانان دانش‌طلب کشورهای بزرگ اروپایی برای کسب دانش به دانشگاههای اسلامی هجوم‌آوردند و هنگام بازگشت به‌کشورهای خود مطالب مفیدی راکه‌آموخته بودند انتشار دادند.

برخلاف روشهای پیشین که‌آموختن علوم صرفاً از روی‌کتاب بود مسلمانان در تحقیقات و اکتشافات علمی خود روش تجربی را واردکردند.(برای‌کسب اطلاع بیشتر به‌کتابهای تاریخ‌علوم تألیف پی‌برروسو ترجمه حسن صفاری و تمدن اسلام و عرب تألیف گوستاولوبون ترجمه سید محمدتقی فخرداعی‌گیلانی وعلم درتاریخ‌تألیف‌جان‌برنال ترجمه‌اسدپور پیرانفر و کامران‌فانی و مقدمه‌ای بر تاریخ علم تألیف جورج‌سارتن ترجمه غلامحسین صدری افشار و ... مراجعه شود).

انسان به‌تدریج پی‌برد که آزمایشهای علمی وتجزیه وتحلیل منطقی را نه تنها درکشف بسیاری از رازهای طبیعت می‌توان بکار برد بلکه از آنها می‌توان درساختن زندگی راحت ومطمئن نیزاستفاده کرد. امروزه روش علمی به‌عنوان وسیله‌ای مناسب برای‌کشف پدیده‌های طبیعت وتشریح وتوجیه آنها قبول شده است ونقش مهمی‌که علم در پیشرفت اجتماع‌کنونی دارد مورد بحث قرارگرفته است .

در قرن شانزدهم میلادی فیزیك به صورت یك‌نظام علمی مستقل و شناخته شده‌ای از مجموعه کم‌وبیش نامنظم دانستنیهای علمی آن زمان جدا شد. کسی‌که در ایجاد این‌نظام سهم مؤثری دارد گالیله (۱۶۴۲-۱۵۶۴م) است . مهمترین‌کارعلمی گالیله مطالعه حرکت است . ارسطو فیلسوف یونانی هم به این‌موضوع توجه داشته‌است ولی طرزکارگالیله از نظر انجام آزمایش و وضع تئوری با کار ارسطو دراین‌مورد قابل مقایسه نیست وگالیله پایه‌محکمی برای پیشرفت دانش فیزیك بنانهاد . مبارزات او از دیدهای‌فلسفی‌آن زمان وکشفهای‌تازه اوسیر‌تحقیقات فیزیکی را بیش ازدوقرن تحت تأثیرقرارداد.

مطالعه سیرتکامل دانش فیزیك بهتر است‌توأم با بررسی وقایع تاریخی که منجر به پیشرفت این دانش شده‌اند باشد، زیرا زمینهٔ تاریخی نه‌تنها‌کمك به افزایش دانش انسان برای درك‌واقعیتهای‌طبیعت می‌کند بلکه تا اندازه‌ای‌هم علل پیشرفت ویا رکود کارهای تهورآمیز علمی را آشکارمی‌سازد گاهی‌هم درگیرشدن بابررسی تاریخی یك‌موضوع علمی‌مفاد آن را مبهم وتاریك می‌سازد و بهتر این است که موضوع از دید روز بررسی شود.

دانش فیزیك درظرف‌قرنهای متمادی به‌وسیله انتشارات مختلف، مانندکتابها، مجلات، مقاله‌ها و گزارشهای دانشمندان قوام گرفت . اینك چکیده چندهزارسال تلاش وکوشش بشر به‌صورت‌یك‌میراث گرانبها در اختیار نسل حاضرقرار داده شده‌است .

فیزیك امروز با فیزیك گذشته تفاوت دارد نه به‌این علت که فیزیك گذشته کم اهمیت و کم‌مایه است بلکه به‌این سبب که فیزیك ازمرزهای پیشین خود گذشته است وفیزیك رها شده گذشته که درون مرزهای خود خوب جستجو شده است دیگر کمترجالب وتحرك‌انگیز است . با وجود این معلومات گذشته پایه‌ای برای دانش امروزمحسوب می‌شود ومسلم است که فراگرفتن آن معلـومات برای آموختن شیوه پیشرفتهای علمی نو الزام‌آوراست .

واقعیتها ـ قانون ـ تئوری

برای این‌که پدیده‌های طبیعت به‌خوبی درك شوند بـاید معلومـات علمـی اندوخته شده تنظیم گردند . خوشبختانه درفیزیك ودرعلوم دیگری کـه با فیزیك ارتباط دارند این‌معلومات به طرز ساده‌ای براساس مشاهدات علمی ونتایج‌تجربی تنظیم‌شده‌اند. این مشاهدات و آزمایشها که معمولا « واقعیتها » نامیده می‌شوند ساده‌ترین مصالحی هستند که در ساختمان بنای معارف علمی بکار می‌روند . اگـر بخواهیم معارف علمی را طبقه‌بندی‌کنیم مجموعـه این واقعیتها نخستین طبقه این معارف را تشکیل می‌دهند . مثالی‌ازاین طبقه ، درکشفیات علمی‌قدیم، مشاهدات پی‌گیرنجومی است که توسط منجمین‌قدیمی به‌ثبت رسیده است و مثالـی دیگر در عصرحاضر ، واقعیتهائی است که ازمأموریتهای‌آپولو به‌دست‌آمده است . گرچه فیزیك دانش تکامل یافته و رسیده‌ای است ولی هنوز هـم درگیر با کشفیاتی از این طبقه است . واقعیتهای فیزیکی که درحال‌حاضر با آنهـا روبرو می‌شویم ممکن است پیچیده و بغرنج به‌نظر برسند زیـرا کشف این واقعیتها نیاز به وسائل آزمایشگاهـی مجهزی دارد که در آنهـا غالباً از اسبابهای الکترونیکی وماشینهای حسابگـر استفاده می‌شود .

واقعیتهای علمی را می‌توان با اجزای یك بازی معما مقایسه‌کرد . همانطور که در این بازی رنگها وشکلهای اجزای بازی راهنمای‌کشف روابط صحیح بین اجزای منفرد آن هستند همان‌طورهم در هرعلمی کلیدها و قواعـدی میان واقعیتهای منفرد وجود دارد که انسان را قـادر به‌کشف روابط بین واقعیتهای منفرد ومتنوع می‌سازد . یك‌پدیده فیزیکی ممکن است منفرد به‌نظر برسد ولـی با انجام چند آزمایش و تجزیه و تحلیل دقیق داده‌هـا می‌توان نمونه‌هائی راکه ارتباط باآن پدیده دارندکشف کرد.

باید در نظر داشت کـه طبیعت‌آن‌قدر پیچیده نیست که هرموقعیت و وضعیت‌آن جلوه‌گاه‌مجموعه‌ای ازپدیده‌های متفاوت باشد . مثلا پدیده‌های طلوع و غروب خورشید وتوالی‌چهارفصل هر دو ، ازحرکت زمین درفضا نتیجه می‌شوند. بنابراین بررسی حرکت زمین سبب درك پدیده‌هائی‌که با این حرکت‌ارتباط دارنـد می‌گـردد . از ارتباط تعدادی از واقعیتها به یکدیگر طبقه بعدی ساختمان معارف علمی بنا می‌شود . الگوئی که این واقعیتها را به هم مرتبط می‌سازد « قانون طبیعی » یا به عبارت ساده‌تـر « قانون » نامیده می‌شود . کشف یك قانون ممکن است مستلزم‌آزمایشهای زیاد‌واندیشیدن بسیارباشد. یك قانون نه‌تنها ارتباط ساده و منظم بین سیماهای مختلف واقعیتهای جدا از یکدیگر را روشن‌می‌سازد بلکه سبب وسعت ادراك وبصیرت ما می‌شود واین اندیشه درمغزماخطورمی‌کندکه‌چنین نظمی‌ممکن است میان پدیده‌هـای هنوزشناخته‌نشده نیز برقرار باشد .

برای بررسی ارتباط بین پاره‌ای ازسیماهای واقعیتها ، قوانین زیررا مرور می‌کنیم :

۱- **قانون ارشمیدس** - جسمی که درمایعی فرو می‌رود از طرف مایع برآن نیروئی وارد می‌شود که برابر وزن مایع جابجا شده توسط آن‌جسم‌است.

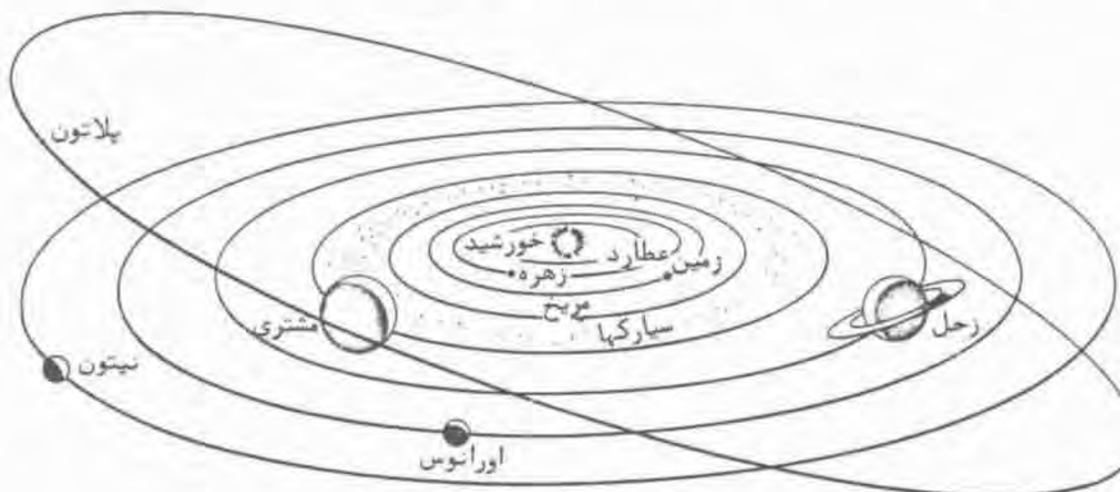
۲- **قانون اول کپلر**[1] **درباره حرکت سیارات** - مدار حرکت یك سیاره به دور خورشید بیضی است کـه خورشید دریکی از کانونهای آن‌قرار دارد .

قانون نخست توسط ارشمیدس درعصرطلائی یونان وقانون دوم توسط کپلرکه باگالیله هم‌عصر بود کشف شد هـریك از این قوانین خلاصهٔ تنظیم شده‌ای از واقعیتهای فیزیکی زیـادی هستند . مثلا قانون ارشمیدس می‌تواند توجیه کندکه چرا یك‌قطعه چوب برسطح‌آب شناور می‌ماند ولی یك قطعه‌آهن درآب فرو میرود . چرا اگر آهن به صورت ورقه در ساختمان بدنـه کشتی به‌کار رود کشتی شناور می‌ماند . ازطرف دیگر دراین‌قانونها اصطلاحات و مفاهیمی مانند نیرو و وزن و حرکت و بیضی به‌کار رفته است که به‌طور وضوح درخود واقعیتها تعریف نشده‌اند .

پرسش۱-۱- می‌دانیدکه می‌توان یك سوزن را برسطح‌آب شناورکرد . آیا این پدیده را می‌توان براساس قانون ارشمیدس توجیه‌کرد ؟

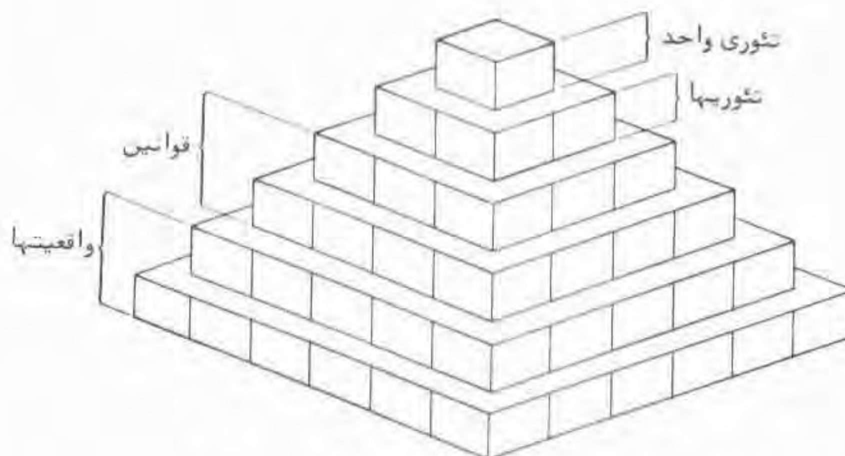
پرسش۱-۲- ازتجزیه وتحلیل قانون بازتابش نور چه واقعیتهائی را می‌توانید با هم ارتباط دهید؟

پیشرفت دانش فیزیك از وقتی آغاز شد کـه دانشمندان پی بردند می‌توان چند قانون را در یك قالب واحد جای داد و از اجتماع آنهـا مجموعه کلی‌تری ساخت . ترکیب چند قانون به صورت یك مجموعه واحد درگذشته مکرر صورت‌گرفته است و



شکل ۱-۲- بنا‌به‌قانون اول‌کپلر مدار حرکت هرسیاره ازجمله زمین به دور خورشید بیضی است

۱-Johannes Kepler (۱۶۳۰-۱۵۷۱م) منجم آلمانی



شکل ۱-۳- مدل هرمی‌شکل برای نشان دادن سازمان متداول معارف علمی .
آیا تئوری واحدی که همه پدیده‌های طبیعت را شامل شود وجود دارد ؟

در آینده هم به تحقیق صورت خواهد گرفت ، فیزیك دانان درکشف موارد متشابه بین پدیده‌هائی که تاکنون مطالعه کرده‌اند بسیار توفیق یافته‌اند و امروزه چندقالب‌یا الگوی بزرگ‌ رامی‌توان برشمرد که تقریباً همهٔ پدیده‌های فیزیکی شناخته شده را دربرمی‌گیرند . این‌قالبهای تعمیم یافته که آخرین طبقه ساختمان تصوری معارف علمی را تشکیل می‌دهند « تئوری » نامیده می‌شوند . ظهورهرتئوری اغلب آغاز یك دوره فعالیت بزرگ را توسط دانشمندان به‌دنبال داشته است و دراثر این‌فعالیتها نتایج تئوری آشکار گردیده است . تئوریها نه‌تنها چکیده پاره‌ای ازپدیده‌های فیزیکی مشاهده شده را عرضه می‌کنند بلکه دانشمندان را به‌کشف‌پدیده‌های جدید نیز ترغیب می‌نمایند .

قوانین و تئوریهای فیزیکی‌که ما به درك‌آنها نائل شده‌ایم از زیبائی وسادگی خاصی برخوردارند. زیباترین تئوریهای فیزیکی در واقع ساده‌ترین آنها هستند وتعداد زیادی ازپدیده‌هارا توجیه می‌کنند. تئوریها با زبان ریاضی بیان شده‌اند وباید دانست که ریاضیات مناسبترین زبان برای بیان تئوریهاست، زیرا تئوریها باکمیاتی سروکار دارندکه عملا اندازه‌گیری و به صورت اعداد عرضه می‌شوند . در جدول ۱-۱ چهار تئوری را که در فیزیك اهمیت خاص دارند آورده‌ایم .

تئوری نخست ، یعنی مکانیك‌کلاسیك ، توسط نیوتن دانشمند انگلیسی وضع شد . نیوتن کارهای علمی‌خود و مواردکاربردآنها را ، چنانکه می‌دانید ، درکتابی به‌نام « اصول ریاضی فلسفه طبیعت [1] » منتشرکرد . بسط تئوری نیوتن چنان اصیل وکامل است که امروزهم فیزیك‌دانها بسیاری از مسائل

۱ـ این‌کتاب دراصل به‌زبان لاتین و به‌نام (Philosophiae Naturalis Principia Mathematica) است.

جدول ۱-۱ تئوری‌های مهم فیزیك

نام تئوری	نخستین واضعان تئوری	تاریخ وضع تئوری	پدیده‌هائی راکه دربرمی‌گیرند
مکانیك کلاسیك	نیوتن	۱۶۸۶ میلادی	حرکت و درگیری اجسامی‌که در ابعاد ومحسوسات انسان هستند
الکترومانیتیك	ماکسول	۱۸۶۸	حرکت ودرگیری‌اجسامی‌که باراالکتریکی دارند شرح خاصیت مغناطیسی
نسبیت خاص	اینشتین	۱۹۰۵	روشن ساختن مفاهیم زمان و مکان
مکانیك کوانتیك	شرودینگر ـ هایزنبرگ بورن ـ بور ـ دیراك	۱۹۲۵-۱۹۲۸	حرکت و درگیری اجسام

مربوط به حرکت را اغلب به‌همان روش نیوتن حل می‌کنند.

پرسش ۱-۳ ـ قوانین حرکت راکه ازتئوری مکانیك کلاسیك نیوتنی نتیجه مـی‌شوند نام ببرید.

دومین تئوری مهمی که درجدول از آن نام برده‌ایم «تئوری الکترومانیتیك» است. درنخستین سالهائی که الکتریسیته ومغناطیس به‌طوراصولی موردمطالعه قرارگرفت هیچگونه ارتباطی بین این دوپدیده ظاهر نشده بود وچند قانونی هم‌که وضع شده بود هریك ازاین پدیده‌ها را جداگانه توصیف می‌کرد نخستین بار درسال ۱۸۱۹ میلادی اُرستد نشان داد کـه جریانهای الکتریکی آثارمغناطیسی به‌وجودمی‌آورند (وشما بااین‌آثار دردرس‌فیزیك سال‌سوم‌آشنا شدید). بعدها فارادی‌کشف‌کرد کـه در میدانهای مغناطیسی می‌توان به‌نوبهٔ خود جریان الکتریکی تولید کرد. درسال ۱۸۶۵ میلادی ماکسول قوانین جدا از هم الکتریسیته ومغناطیس را درقالب علمی بزرگی‌باهم ترکیب‌کرد وتئوری الکترومانیتیك را به‌وجودآورد.

سومین تئوری‌که درجدول ازآن نام‌برده‌ایم «نسبیت خاص» است. این تئوری درآغاز قـرن حاضر توسط اینشتین به‌وجود آمد وکشف‌آن‌انقلاب بزرگـی در دانش فیزیك پدید آورد. مهمترین خصوصیت تئوری نسبیت این بود که ذهن فیزیك‌دانان را دربارهٔ مفاهیم مکان وزمان روشن ساخت. این تئوری امروز درواقع محصول‌ترکیب‌الکترومانیتسیم ومکانیك کلاسیك است.

دانشمندان به سبب موفقیتهائی‌که درگذشته داشته‌انـد همواره معتقد هستند کـه رازهای نهفته طبیعت را آشکار خـواهند ساخت و همین اعتقاد و ایمان است‌که به آنان جرأت می‌دهد تا با شهامت آزمایشهای خودرا دنبال‌کنند وبه‌پرسشها پاسخ‌دهند. مثلا در دو دهه‌اول این قرن‌که فیزیك‌دانان نخستین مراحل پی‌گردی و اکتشاف اصولی خود را دربارهٔ شناخت اتم‌آغازکردندودریافتندکه تئوریهای‌موجود قادر نیستند نتایج حاصل از آزمـایشها را توجیه و تفسیرکنند. بنابراین دانشمندان کوشش‌کردند کـه نتایج آزمـایشها را با یك تئوری تازه بیان کنند. در راه تطبیق‌آن نتایج با تئوری بود که «مکانیك

کوانتیک » تولد یافت .

درسال ۱۹۲۵ میلادی پاولی[1] در نامه‌ای به‌یکی ازدوستان خود نوشت « فیزیك دراین زمان دوباره بسیار درهم وبرهم شده است وبرای‌من‌تصور آن بسیاردشوار است . من آرزو دارم که یك بازیگر تئاتر یا چیزی مانند آن بودم وهرگز چیزی دربارهٔ فیزیك نشنیده بودم .» اکتشافات پاولی ودانشمندان دیگر سرانجام‌راهنمای‌وضع «تئوری‌کوانتوم مکانیك» شد یعنی تئوری‌که دانشمندان را موفق به توجیه و تفسیر بسیاری ازسیماهای دنیای اتمها کرد .

با ظهورتئوریهای نسبیت و مکانیك‌کوانتیك ، فیزیك‌دانها متوجه شدند کـه مکانیك کلاسیك یك تئوری تقریبی است‌که فقط برای توجیه پدیده‌ها و حل مسائل متداولی‌که در ابعاد ومحسوسات انسان هستند قابل قبول است ولـی در توجیه پدیده‌های مربوط به دنیای اتم بی اعتبار است . علاوه براین معلوم شدکه تئوری الکترومانیتیك نیز در توجیه و تفسیر تعدادی از پدیده‌های اتمی ناقص است و از پیوند این‌تئوری با مکانیك‌کوانتیك ، تئوری کلی‌تری به‌نام « کوانتوم الکترودینامیك » پدیدآمد .

بدنیست بدانیدکه دانشمندان فیزیك ، امکان رسیدن به‌یك تئوری واحد راکه شامل تمام‌تئوریهای موجود باشد پیشگوئی می‌کنند . زیـرا تئوریهای موجود مستقل از هم نیستند . وجوه مشترك این تئوریها نشان می‌دهدکه باید وحدتی‌بین‌آنها وجود داشته باشدکه هنوز به درستی کشف نشده است.

فیزیك آفرینندهٔ فعالیت انسان

اگر به‌فیزیك همچون مخزنی از دانستنیهای انباشته شده بنگریـم معنی و مقصود این دانش را درست درك نکرده‌ایم. فیزیك با تازگیها و ویژگیهای مخصوص به خود یك‌دانش دائماً درحال تغییراست. مسائلی‌که نسل پیش‌ازما درجستجوی حل‌آنها بود اکنون حل وکنارگذاشته شده وکشفیات و تئوریهای تازه جانشین آنهاگردیده است . انسان از میان این مسائل دائماً درحال تغییر اطلاعات خود را دربارهٔ جهان‌کسب کرده ومی کند .

فیزیك‌دانان‌معمولاًفعالیت خوددرادررشته‌فیزیك تئوری‌ویا دررشته فیزیك‌تجربی متمرکزمی‌کنند. باید دانست‌که مرزمشخص‌ودقیقی بین این فعالیتها وجود ندارد زیـرا همهٔ تحقیقات موفقیت‌آمیز تحت تأثیر متقابل‌آزمایش‌وتئوری می‌باشند: فیزیك‌دانان تجربی نخست آزمایشهای خود را طرح‌ریزی می‌کنند سپس به انجام‌آنها می‌پردازند تا اطلاعات تازه‌ای دربارهٔ پدیده‌های مورد نظرخود بدست‌آورند . تئوری‌دانان مسائلی را به صورت معادلات ریاضی بسط می‌دهند که باحل‌آنها یك پدیده فیزیکی تعبیروتفسیرمی‌شود . تحقیقات تئوری‌هم اغلب برای اثبات نتایج‌حاصل ، آزمایشهای تازه‌ای را برمی‌انگیزند . وقتی‌درگیری بین تئوری و آزمـایش منجر به‌پیشرفت تازه‌ای در دانش فیزیك بشود بسیاری از فیزیك‌دانان برای شکوفا کـردن نتایج پیش‌بینی شده به سرعت به‌آن روی می‌آورند و به‌این ترتیب سرگرمی تازه‌ای‌برای

---

[1] W. Pauli ‏(۱۹۵۸-۱۹۰۰) فیزیك‌دان اتریشی کـه درسال ۱۹۴۵ موفق به دریافت جایزه نوبل درفیزیك شد (برای‌کشف اصلی‌که به‌نام خود اواصل پاولی‌نامیده می‌شود).

آنان پیدا مـی‌شود . گاهی از میان این سرگرمیها ممکن است راهی به‌سوی یك تحقیق تازه پیدا شود که به‌کشف مهمی منجر گردد. بنابراین اگرفیزیك‌دانان می‌خواهند نتیجهٔ کارهای آنان ثمربخش باشد باید پیش ازانجام یك آزمایش یاطرح یك تئوری در بارهٔ نتایج حاصل‌ازآن پیش‌بینی و قضاوت درست و ارزنده‌ای بنمایند .

روش تحقیق دانشمندان محدود ومقیدنیست. فرمول وروش خاصی‌هم برای اکتشاف وجودندارد مثلا دو دانشمند واجد صلاحیت برای اندازه‌گیری یك اثر ممکن است از دونوع وسیله متفاوت استفاده کنند . در تحقیقات تئوری هم دو فیزیك‌دان ممکن است برای رسیدن به‌یك نتیجه روشهای ریاضی کاملا متفاوت به‌کاربرند . زیرا سلیقه وهوشمندی وتخیل وطرز تفکر و طرزآموزش جستجوگـران معمولا از عواملی هستند که دراین تفاوتها مؤثرند . بنابراین فیزیك یك دانش آفریننده است‌کـه قالب یا روش خشك ومحدود درآن وجود ندارد . تنهـا قید آن این است کـه باید سیماهای طبیعت را بـه درستی توجیه کند .

بخشهای فیزیك

فیزیك‌دانان برای آسانـی‌کار خود فیزیك را به‌قسمتهائی که درهرقسمت گـروهی از آنان منافع مشترکی دارند تقسیم‌کرده‌اند . هریك ازاین‌قسمتها را «بخش‌فیزیکی» می‌نامند. نام برخی از بخشهای‌جدید فیزیك درجدول ۱-۲ آورده شده است . مـرزهای این‌بخشها تا اندازه‌ای قراردادی است زیرا فیزیك‌دانهائی‌که در بخشهای مختلف کار می‌کنند منفرد و جدا ازهم نیستند . آنان تئوریهای یکسان و در بسیاری از حالات فنون تجربی یکسان بکار می‌برند به همین جهت پیشرفت دریك‌بخش معمولاالهام‌بخش قسمتهای دیگراست . درهریك ازاین بخشها فیزیك‌دانان یـا تئوری‌کارند ویا آزمایشگر .

جدول ۱-۲- بخشهای فیزیك

فیزیك ذرات بنیادی
اپتیك
فیزیك هسته‌ای
فیزیك اتمی ـ ملکولی و الکترون
فیزیك پلاسما وشاره‌ها
فیزیك حالت جامد
فیزیك ستاره‌ها و سیاره‌ها
آکوستیك
فعالیتهای دیگر

پرسش ۱-۴ - به‌نظرشماکار کدام یك ازاین دو دسته‌آسانتراست وچرا ؟

فیزیك و علوم دیگر

مدلهائی که توسط فیزیك‌دانان برای توجیه پدیده‌های طبیعت ارائه شده است به‌طور روزافزون درعلوم تجربی دیگر به‌کار گرفته شده است. امروزه زیست‌شناسی ، شیمی ، زمین‌شناسی ، فیزیك ونجوم همه یك‌جورساختمان تصوری ماده را دربسط مدلهای علمی خود به‌کارمی‌برند . مثلا فیزیك‌دانان نخست به بررسی ساختمان اتم و ذرات بنیادی و درگیری آنها علاقمند شدند . شیمی‌دانان دانش اصلاح شده اتم را درمطالعهٔ پیوند اتمها برای تشکیل‌ملکولها

به‌کار بردند و زیست‌شناسان به نوبه خود همهٔ این اطلاعات‌را برای بررسی نظم وترتیبی که بین‌ملکولها در موجود زنده وجود دارد مورد استفاده قرار دادند . وحدتی که در علوم تجربی وجود دارد در بسیاری از موارد این علوم را چنان به هم نزدیک کرده است که گاهی تشخیص مرزهای آنها ازیکدیگر مشکل است . علم نجوم هم اطلاعات با ارزشی را از دانش فیزیک کسب کرده است ، زیرا می‌توان در آزمایشگاه پاره‌ای ازآنچه راکه درستارگان یا در فضای میان‌آنها وجود دارد نشان داد . فیزیک‌دانها به‌سبب منافع مشترك دیگری کـه در پاره‌ای از پژوهشهای علمی خود داشته‌اند شاخه‌های دیگری ازدانش فیزیك مانند بیوفیزیك (فیزیك زیست) ، ژئوفیزیك (فیزیك‌زمین)، سریك فضا رانیز به وجود آورده‌اند . هزینه سنگین تحقیقات تجربی مسائلی را درقبال پیشرفت دائمـی فیزیك به وجود آورده است . از زمان جنگ دوم جهانی تاکنون سه‌بخش فیزیك هسته‌ای و فیزیك ذرات‌بنیادی به‌ویژه فیزیك حالت جامدقسمت عمده مخارج را به‌خوداختصاص داده‌اند. رشد خارق‌العاده فیزیك حالت جامد بعداز جنگ دوم جهانی مدیون اختراع ترانزیستور درسال ۱۹۴۷ میلادی است . زیـرا بـدون الکترونیك ترانزیستوری ساختن کمپیوترهای بزرگ و سیستم پیچیده مخابرات به‌ویژه درماهواره‌های مخابراتی و سفینه‌های فضائی مشکل می‌نمود .

فیزیك کلاسیك و فیزیك مدرن

معمولا رسم براین است‌که سیر تاریخی علم فیزیك را به دو دوره تقسیم می‌کنند :

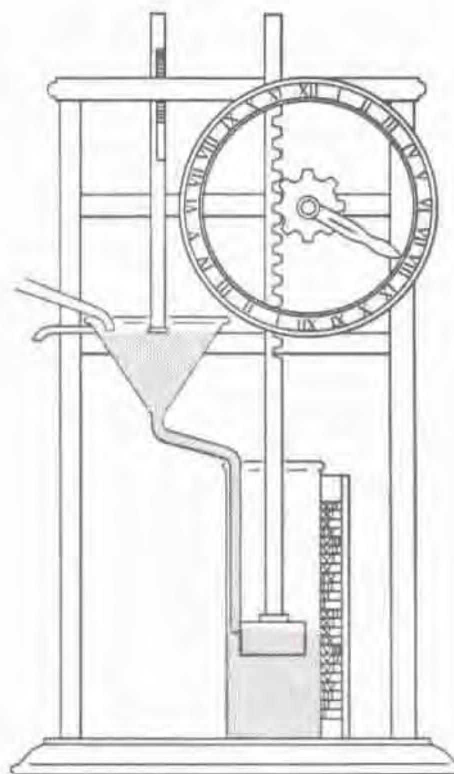
دوره فیزیك کلاسیك‌که به اواسط آخرین‌دههٔ قرن نوزدهم میلادی ختم می‌شود .

دوره فیزیك جدید (فیزیك مدرن) که ازپایان دوره فیزیك کلاسیك آغاز می‌شود و تا حال حاضر ادامه دارد .

در دوره کلاسیك ، قوانین وتئوریهائی وضع شدندکه فقط پدیده‌های حاصل ازتجسسهای تجربی مستقیم را توصیف و توجیه می‌کردند . منابع‌مالی برای تحقیقات علمی محدود بود و روشی استوار و منطقی برای پیشرفت تکنیك وبهبود ابزارهای‌علمی وجود نداشت . بنابراین انجام آزمایشهای گسترده و پرخرج اگر غیر ممکن نبود بسیار مشکل بود . به سبب همین محدودیتهای تجربی ، دانش فیزیك بیشتربا‌پدیده‌هائی سروکار داشت‌که با حواس‌انسان ارتباط داشتند واین‌منطقی است . زیرا ابتدائی‌ترین ابزارهای تجربی حواس پنجگانه بینائی ، شنوائی ، بساوائی ، چشائی و بویائی هستند . انسان بتدریج اسبابهایی مانند دماسنج و ساعت را اختراع کـرد که قابلیت تجربی اورا وسعت دادند ولـی ازابتدا باآن اسبابها فقط پدیده‌هائی را می‌توانست جستجو کندکه مستقیماً آنها را مشاهده می‌کرد . در پایان دوره کلاسیك فیزیك به قسمتهای کاملا متمایز زیر تقسیم شد .

مکانیك
ترمودینامیك
اپتیك
الکتریسیته‌ومغناطیس

جالب‌است یادآورشویم‌که تمام این‌تقسیمات با پدیده‌هائی‌که ذهن انسان باآنهـاآشناست رابطهٔ نزدیك دارند ؛ درمکانیك ازحرکت‌گفتگو می‌شود و حرکت از آشکارترین سیماهـای دنیای محسوسات



شکل ۱-۴- مطالعه حرکت یك جسم احتیاج به اندازه‌گیری زمان داشت. ساعت آبی نمونه قدیمی این وسیله است. ساعت با ندول‌دار دراواسط قرن هفدهم میلادی اختراع شد .

انسان است. ترمودینامیك ، یا به عبارت دیگر دانش گرما ، بااحساس فیزیولوژیکی انسان سروکاردارد . اُپتیك مربوط به‌حس بینائی می‌شود . مقایسه بخشهای فیزیك‌کنونی با قسمتهای فیزیك کلاسیك پیشرفت دانش فیزیك را در این قرن نشان می‌دهد .

نباید تصور کردکه بخشهای فیزیك کلاسیك دیگر قابل‌توجه نیستند . در واقع هنوزهم دردوره تحصیلات عالی فیزیك ، مقدار زیادی از دروس براساس تقسیمات فیزیك کلاسیك تنظیم می‌شود. زیرا مطالب فیزیك کلاسیك برای فهمیدن فیزیك مدرن درحکم پایه است .

مهمترین تئوریهای دوره کلاسیك دو تئوری مکانیك کلاسیك و الکترومانیتیك است که درجدول ۱-۱ ازآنها نام برده‌ایم . این تئوریها در اواخر دوره کلاسیك بیشترپدیده‌های فیزیکی را که درآن زمان شناخته شده بودند توصیف می‌کردند . بعضی از دانشمندان مشهور آن دوره ادعا می‌کردند که



شکل ۱-۵- ساعت‌اتمی اداره اوزان ومقیاسات امریکا واقع در کلورادو که براساس ارتعاشات اتم‌سزیم کار می‌کند.

تئوریهای اساسی فیزیك را وضع کرده‌اند وکشفیات جدیدهم باید باآن تئوریها توجیه شوند . ولی معلوم شدکه این دانشمندان در اشتباه بوده‌اند .

پرسش ۱-۵- به‌نظر شما اگر درآینده چنین ادعائی بشود آیا واقعیت خواهد داشت ؟

به‌تدریج که اسبابهای دقیقتری برای مطالعات علمی ساخته شد توجه دانشمندان به‌دنیای ملکولها

واتمها و ورای آنها معطوف شد ودانشمندان متوجه شدند که تئوریهای موجود قادر نیستند پدیده‌های تازه را توجیه کنند . عصر جدید فیزیك ازآنجا آغاز شد که دانشمندان کشف کردند بعضی ازپدیده‌های تازه با تئوریهای موجود مطابقت نمی‌کنند وبرای شناخت آنها تئوریهای جدیدی لازم است . نسبیت خاص و کوانتوم مکانیك بزرگترین تئوریهائی بودند که به دنبالهٔ همین افکارظاهر شدند . این دوتئوری علل بیشتر نتایج تجربی را بیان می‌کنند وپدیده‌های ملکولی و اتمی و هسته‌ای را بـه نحو رضایت بخشی توجیه می‌نمایند .

کوانتوم مکانیك وقتی توسعه یافت که دانسته شد بسیاری ازکمیتهای فیزیکی کوانتائی هستند . یعنی به صورت مضربهائی از یك واحد یا یك جزء کوچك بنیادی وجود دارند . مثلا پول ما یك کمیت کوانتائی است زیرا هرمقدار ازآن به‌صورت‌مضربی ازیك واحدکوچك به‌نام ریال ، یا واحدکوچکتر به‌نام دینار است . ماده‌هم طبیعت کوانتائی دارد یعنی از ملکول واتم وذرات کوچکتر بنیادی تشکیل یافته است.

بنابراین طبیعت کوانتائی ماده وقتی ظاهر می‌شود که این ذرات کوچك درعمل وارد شوند.

مدل ذره‌ای

یکی ازمدلهائی که از زمانهای قدیم درفیزیك انتخاب شده است مدل یاقالب ذره‌ای است . مدل ذره‌ای ، درحالت خیلی ساده ، به این واقعیت تعلق می‌گیرد که ماده در دنیائی که درآن زندگی می‌کنیم از اشیاء و اجزاء مختلف مانند سنگها ، درختان ، خانه‌ها ، اتومبیلها ، ماهواره‌ها ، ستارگان و..... تشکیل یافته است . هـریك از این اشیاء ساختمان درونی خیلی پیچیده‌ای دارند ولی دربعضی ازموارد می‌توان این ساختمان درونی را نادیده گرفت و هر شیء را همچون جسم واحدی که درحکم یك ذره است دانست. مثلا درحرکت زمین به‌دور خورشید ، ساختمان درونی زمین وسیماهای متفاوتی‌که درسطح آن هستند نقشی دراین حرکت ندارنـد و زمین را می‌توان درحکم ذره‌ای گرفت کـه در فضا حرکت می‌کند .

واردکردن مدل ذره‌ای در فیزیك به پیشرفت این دانش‌کمك بسیار مؤثر ومفیدکرده است. گالیله و نیوتن هردو ، مفهـوم ذره (دراینجا بهتر است بگوئیم جسم کوچك) را در کشف قوانین حرکت اجسام مختلف به‌کار برده‌اند . همه اشیای‌متداول در واقع دارای ساختمان درونی پیچیده‌ای هستندکه ممکن است درحرکت‌آنهـا مؤثر باشد و این کیفیت بایـد در پاره‌ای از موارد درنظر گـرفته شود مثلا اصطکاك یکی ازاین موارد است .

مدل ذره‌ای به همین‌جا ختم نمی‌شود . زیرا معمولا هر شیء را می‌توان در حکم مجموعه‌ای از اجزاء کوچکتر ماده درنظر گرفت‌که بازهم ذره‌نامیده می‌شوند . یك‌سنگ را می‌توان به‌ذرات‌کوچك خاك سنگ خردکـرد و یك اتومبیل را به‌اجزاء تشکیل‌دهنده‌اش پیاده نمود . بنابراین سنگ را می‌توان مجموعه‌ای ازذرات‌کوچك خاك‌سنگ واتومبیل را ترکیبی ازمهره‌ها وپیچها وقطعات کوچك دیگر در نظر گرفت. اگرقوانین طبیعت‌که حاکم بر رفتار ذرات منفرد هستند شناخته شوند رفتار شیء مرکب هم کـه مجموعه‌ای از این ذرات درگیر و مرتبط با هم است پیشگوئی خواهد شد . مثلا وقتی که نیوتن قانون جاذبه عمومی را بسط داد درگیر با این مسئله شد

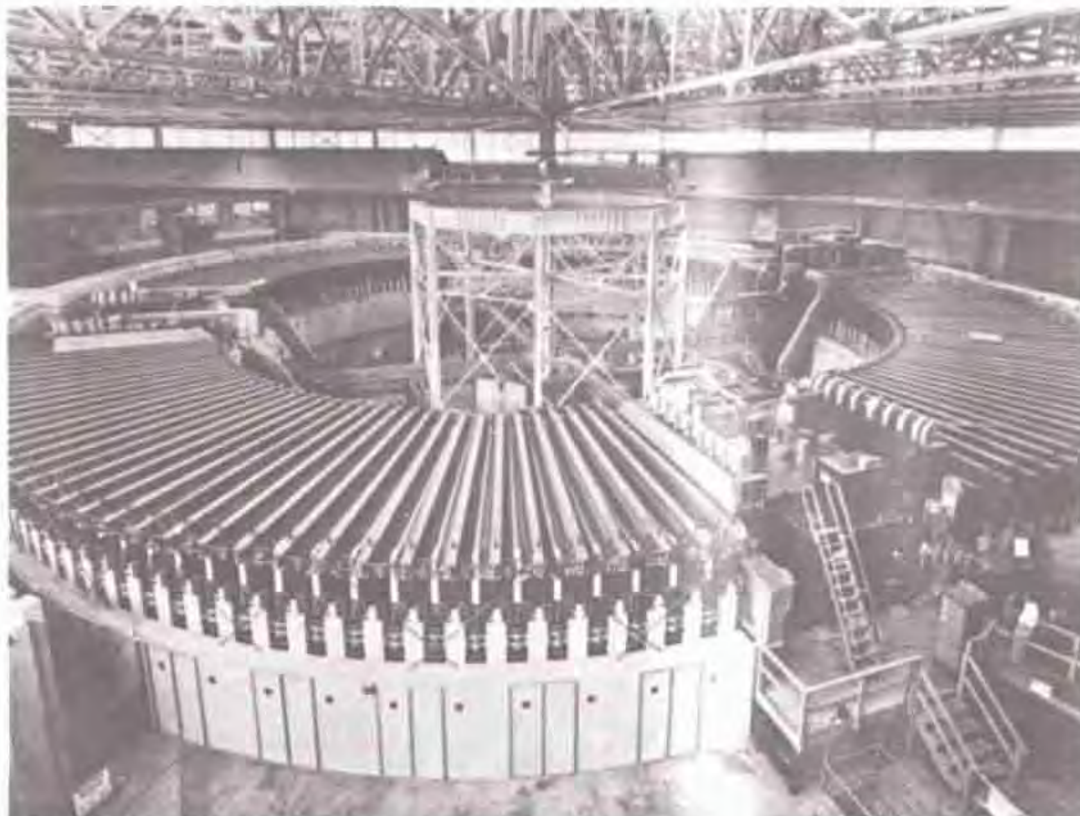
که چگونه اثر جاذبه زمین را بر اجسام واقع بر روی سطح آن معین کند. با درنظر گرفتن این که زمین درحکم یك جسم متشکل از ذرات کوچك ماده‌است، وی اثر کلی جاذبه‌ای را که تمـام اجزاء مختلف تشکیل‌دهندهٔ زمین بر اجسام وارد می کنند معادل اثری دانست که یك ذره فرضی واقـع درمرکز زمین کـه جرمش برابر جرم زمین است وارد می‌سازد.

این‌مسئله کـه آیا مـاده ساختمان پیوسته‌ای دارد یا این‌که قابل تقسیم به اجزاء خیلی کوچك است مدتها یکی ازمشغولیات انسان اندیشمند بوده است. اندیشه‌های قدیمی درنوع خود جالب هستند ولی هیچگاه ازصورت تصور خارج نشده‌اند و هیچ آزمایشی درآن زمانها برای تحقق بخشیدن به‌آن اندیشه‌ها صورت نگرفته است.

پرسش ۱-۶-آیا نمونه‌هائی از این‌اندیشه‌ها را می‌شناسید؟

این مسئله هنوز حل‌نشده بودکـه نیوتن در کتاب دیگر خودبه‌نام اُپتیك، اندیشه خود را در این باره چنین بیان‌کرد:

« به‌نظرمن محتمل است که خدا ازآغازخلقت ماده را به‌صورت ذرات متحرك جامد، توپر، محکم، نفوذ ناپذیر باچنان‌ابعاد وشکلها و با چنان خواص و



شکل ۱-۶- یك دستگاه شتاب دهنده ذرات باردار، دراین دستگاه به‌پروتونها در میدانهای الکتریکی و مغناطیسی بسیار قوی شتاب داده می‌شود.

چنان نسبت درفضا آفرید که منجر به‌مقصود نهائی او از خلقت آن گردید ؛ که این ذرات جامد اولیه عالم هستی به‌مراتب سخت‌تر ازهمهٔ اجسام خلل و فرج داری هستند که ازاجتماع آنها به‌وجود آمده‌اند، آن‌قدر سخت که هرگز فرسایش ندارند ونمی‌شکنند. هیچ قدرت معمولی درعالم هستی نمی‌تواند آن‌چه راکه خدا درآغاز خلقت به‌وجودآورده است تقسیم کند . »

دویست سال سپری شد تـا مـدرك تجربی ثمربخشی ازطبیعت ذره‌ای بودن ماده به‌دست‌آمد . اکنون چنین استنباط شده است که ماده ازتعداد زیادی ذرات بـه‌نام ملکول تشکیل یـافته است و بیش‌از یك میلیون نوع مختلف ملکول شناخته شده است. ملکولها ساده‌ترین ذرات ماده نیستند وبه طوری که می‌دانید از اجتماع ذرات کوچکتری بـه‌نام اتم تشکیل یافته‌اندکه ۱۰۵ نوع آنها تاکنون کشف شده است . نخستین دانشمندی کـه مفهوم اتم را در ساختمان ملکول واردکرد دالتون[1] بود . او دریك کتاب خود به نام سیستم جدید فلسفه شیمی[2] چنین اظهار می‌دارد : « تجزیه و ترکیب شیمیائی چیزی جز این نیست‌که ذرات را یکی ازدیگری جداکرده و دوباره‌آنها را باهم پیوند دهند» . ذراتی‌که‌دالتون ازآنها نام برده است همانهائی هستندکه ما آنها را اتم (لفظ یونانی به‌معنای تقسیم ناپذیر) می‌نامیم. خود دالتون ۲۰ نوع ازاتمها را شناخت .

ظهور نظریـه اتمی ماده یکـی از مهمترین پیشرفتهای هوشمندانه قرن نوزدهم است . ولـی ساختمان ماده محدود به‌این‌نظریه باقـی‌نماند . در سال ۱۸۹۷ میلادی سر ج . ج . تامسون الکترون راکه‌جرمش تقریباً ۲۰۰۰ مرتبه ازجرم اتم‌هیدروژن، سبکترین عنصر شناخته شده ، کمتراست‌کشف‌کرد. این‌کشف مهم ، دانشمندان را متوجه ساخت‌که اتم کوچکترین جزء ماده نیست وکنجکاوی فیزیك‌دانان برای شناسائی اجزاء تشکیل دهنده اتم شروع‌شد . درسال ۱۹۱۱ میلادی رادرفورد مدلی‌کردکه‌بیشتر جرم اتم در هسته‌آن متمرکز است والکترونها بـه دور هسته می‌چرخند و این مدل شباهتی به‌منظومـه



شکل۱-۲- گلبولهای قرمزخون که توسط میکروسکپ‌الکترونی ۱۵ هزار مرتبه بزرگ شده‌اند .

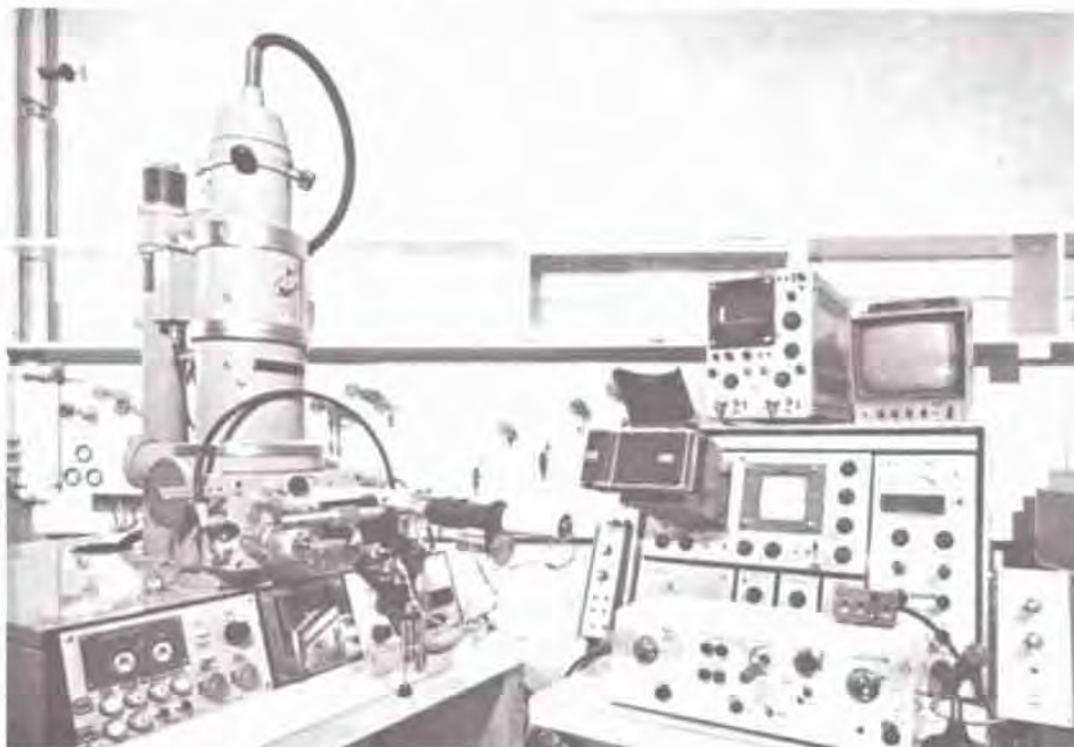
۱- John Dalton (۱۷۶۶-۱۸۴۴ م) دانشمند انگلیسی که در بارهٔ بیماری تشخیص رنگ به نام دالتونیسم نیز مطالعه‌کرده است .

۲- New system of chemical phylosophy

شمسی داشت. درسال ۱۹۱۲ میلادی توافق‌نظر کلی بوجود آمدکه هسته اتم هم ساختمان مرکبی دارد و از ذرات کوچکتری‌تشکیل یافته است و رادرفورد در سال ۱۹۱۹ میلادی موفق به‌شناختن یکی ازاین ذرات گردیدکه نام «پروتون» برآن‌نهاده‌شد. درسال ۱۹۳۲ میلادی چادویک[1] ذره دیگردرون هسته‌یعنی «نوترون» راکشف‌کرد. اکنون هسته اتم‌رابصورت مجموعه‌ای ازپروتونها ونوترونها می‌شناسد.

امروزه بین دانشمندان اتفاق‌نظر کلی وجود داردکه ماده دارای طبیعت ذره‌ای است زیراهمچون مجموعه‌ای از سه نوع ذرات بنیادی پروتونها و نوترونها و الکترونهاست. و انسان پس از صدها تحقیق بسیار مشکل وپرخرج یك مدل تصوری و ساده و جالب را برای شناسائی ساختمان ماده و توجیه پدیده‌های مربوط به‌آن انتخاب‌کرده است.

بدنیست بدانید که براساس اندیشه‌های نو، پروتون و نوترون هم از ذرات کوچکتری تشکیل یافته‌اند. درسالهای اخیر یك تئوری توسط گلمن[2]



شکل ۱-۱- میکروسکپ الکترونی در سمت چپ تصویر لوله میکروسکپ و درسمت راست‌آن وسائل تکمیلی میکروسکپ دیده می‌شود.

۱- J. Chadwich (۱۸۹۱- م) دانشمند انگلیسی که در سال ۱۹۳۵ موفق به‌دریافت جایزه نوبل شده است.

۲- Murray Gell-Mann (۱۹۲۹- م) فیزیك‌دان آمریکائی‌که در سال ۱۹۶۹ موفق به دریافت جایزه نوبل شده است.

و زوایك[1] وضع شده است که برطبق آن پروتون یا نوترون از ذرات کوچکتری بـه نام کوارك[2] تشکیل یافته است که بار الکتریکی آنها $\frac{2}{3}$ یا $\frac{1}{3}$ بار الکتریکی الکترون است .

باوجود آزمایشهای زیادی که تا کنون برای کشف وشناسائی کوارك انجام شده هنوز توفیقی در این باره حاصل نگردیده است. نتایج منفی آزمایشها فعلا وجود کوارك‌را مشکوك ساخته است. ازطرف دیگر تئوری ذره‌ای کوارك یکی ازموفقترین تئوریهای ذرات بنیادی است که خواص ذرات را توجیه می‌کند. شکستی که تاکنون در کشف کوارك نصیب فیزیکدانان شده آنان را در وضع ناهنجاری قرارداده است و باید منتظر آینده بود .

به‌این پرسشها پاسخ دهید .

۱) وجوه تشابه و اختلاف بین نظامهای فیزیك و ریاضی را با هم مقایسه کنید .

۲) قانون اول کپلر درباره حرکت سیارات این است که مدار حرکت آنها به‌دور خورشید بیضی است . آیا این قانون به‌طور دقیق درست است یا این که مدارها شکل پیچیده‌تری دارند ؟ چگونه به‌این پرسش می‌توان پاسخ داد ؟

۳) چه فرقی بین قانون وتئوری وجود دارد ؟

۴) مثالهائی از واقعیتها ، قوانین و تئوریها درپاره‌ای از نظامهای علمی دیگر که با آنها آشنا هستید بیاورید .

۵) آیا ممکن‌است درستی یك قانون یایك تئوری فیزیکی مانند یك‌قضیه ریاضی ثابت‌شود؟

۶) داستانهائی را که با آنها آشنائی دارید نام ببرید کـه درآنها یکی ازمنشها (یعنی خصوصیات اخلاقی) یك دانشمند توصیف شده باشد ونوع منش دانشمند را مشخص کنید .

۷) توضیح دهیدآیا علوم دیگر، مثلا ریاضیات یا تاریخ ، مانند علم‌فیزیك نیز به‌بخشهائی تقسیم می‌شوند ؟

۸) وحدتی که درپدیده‌های طبیعت موجود است سبب شده است که بخشهای علم فیزیك به هم ارتباط داشته باشند . آیـا چنین ارتباطی در نظامهای علمـی دیگر نیز وجود دارد ؟ توضیح دهید .

۹) وجوه تمایزی که دوره‌های فیزیك کلاسیك و مدرن را ازیکدیگر جدا می‌سازند کدامند؟

۱۰) با توجه به‌این که فقط در قرن بیستم آزمایشهای فیزیکی با تجهیزات پرخرج و پر

۱- Zweig محقق آلمانی .

۲- Quark

مهارت انجام شده ومی‌شوند ، نوع اسبابهائی که توسط عده‌ای ازدانشمندان قدیم مانند ولتا ، فرانکلین ، کولن ، فارادی بکار رفته‌اند معین کنید وموارد کاربرد آنها را مشخص نمائید .

۱۱) درچه مواردی می‌توان منظومهٔ شمسی را درحکم یك ذره یا مجموعه‌ای ازذرات دانست .

۱۲) می‌دانید کوتاهترین زمانی که ممکن است دانستن‌آن برای شما جالب باشد زمانی است که نورقطر هسته اتم هیدروژن را می‌پیماید. باتوجه باین مطلب آیا می‌توان زمان را یك کمیت کوانتائی دانست ؟

۱۳) به‌طور اختصار اختلاف بین روش ذهنی و روش واقعی اندازه‌گیری دمای یك ظرف آب را شرح دهید .

۱۴) در نظر بگیرید که می‌خواهید عرض یك رودخانه را که وضع طبیعی آن مانع اندازه‌گیری مستقیم است معین کنید . وسیله اندازه‌گیری طول (مثلا نوارمتری) و اندازه‌گیری زاویه (مثلا تئودولیت) دراختیار دارید. چگونه می‌توانید عملا عرض رودخانه را برآوردکنید؟

پاسخ به پرسشهای متن

۱-۱) نه ، زیرا شناورماندن سوزن برروی‌آب مربوط به‌قانون ارشمیدس نیست‌بلکه علت آن وجود نیروهای‌کشش سطحی است . (به‌کتاب فیزیك سال اول نظری مراجعه‌کنید).

۱-۲) شعاع نور ، زاویه‌های تابش وبازتابش ، سطح صیقلی ، پخش نور ، آینه ، تصویر درآینه خاصیت تقارن و ...

۱-۳) قانون اینرسی یا ماند ـ قانون تناسب شتاب ونیرو و قانون عمل وعکس‌العمل.

۱-۴) کارفیزیك‌دانان تئوری‌آسانتر است زیرا احتیاج به‌وسائل پرخرج‌آزمایشگاهی ندارند.

۱-۵) نه ، زیرا هرپیشرفتی درعلم مسائل نوی را به‌وجود می‌آورد به‌طوری‌که هیچگاه نمی‌توان کار تحقیق وپیشرفت را درهیچ‌یك ازشاخه‌های علوم خاتمه یافته تلقی‌کرد .

۱-۶) دموکریت[1] احتمالا بزرگترین فیزیك‌دان و فیلسوف یونان قدیم است که هم‌عصر با سقراط بود . او فرض‌کرد ماده‌ای‌که جهان را تشکیل داده ازبینهایت ذرات نامرئی تشکیل یافته‌است . چندقرن بعد لوکرتیوس[2] شاعررومی نیز از ذرات نامرئی وتراکم ناپذیرنام‌برده است.

۱- Democritus (۴۶۰-۳۷۰ ق . م)

۲- Lucretius (۹۸-۵۵ ق . م)

۲

حرکت بر روی خط راست

سرعت ـ شتاب

آموزش فیزیك پایه ، معمولاً ازمکانیك کلاسیك شروع می‌شود. اهمیت مکانیك به‌این سبب است که آموختن رشته‌های دیگر فیزیك مستلزم فراگرفتن این شاخه از دانش است .

مکانیك شاخه‌ای ازدانش فیزیك است که درباره چگونگی حرکت و سکون اجسام وعلل و شرایط آنهـا گفتگو می‌کند و خود به دو قسمت سینماتیك[1] و دینامیك[2] تقسیم می‌شود . سینماتیك دربارهٔ چگونگی انواع حرکتها بدون ذکرعلل آنها به بحث‌تحلیلی وریاضی می‌پردازدودر واقع سرآغازعلم مکانیك‌است. دینامیك ازعلل حرکت وسکون اجسام بحث می‌کند وخود بـه دوقسمت **استاتیك**[3] (کـه از تعادل اجسام‌درحال سکون گفتگومی‌کند) وسینتیك[4] (که به‌بحث‌دربارهٔ تغییرحرکت دراثر نیرو می‌پردازد) تقسیم می‌شود.

شما درکتاب فیزیك سال اول با حرکتهای ساده و اصطلاحات سرعت و شتاب آشنا شده‌ایـد . دراین‌جا بابحث تحلیلی و ریاضـی پیشرفته‌تری مطالب مورد بحث را دنبال خواهیدکرد .

حرکت اجسام ـ می‌دانیم جهان پراز اجسامی‌است که در حرکتند ، از ذرات کوچك مانند ملکولهای هوا و ذرات‌گرد وغبار معلق درهوا تا کهکشانهای بزرگ . اتمهای درون اجسامی هم که به‌ظاهرساکن هستند دائماً درحال ارتعاشند. حرکت وسرعت‌بعضی ازاین اجسام کـه ساخته دست انسانند ، مـانند اتومبیلها و موشکها قابل‌کنترل است ، ولی حرکت طبیعی‌پاره‌ای ازاجسام چنان پیچیده است که‌به‌آسانی نمی‌توان آن را بررسی‌کرد . مثلا یکی ازحرکتهای بسیار متداول طبیعی افتادن برگ ازدرخت است .

۱- Cinematique (به‌زبان فرانسوی) که به‌زبـان انگلیسی Kinematics گفته می‌شود

۲- Dynamics   ۳- Statics

۴- Cinetique (به‌زبـان فرانسوی) که به‌انگلیسی Kinetics گفته می‌شود .

برگ دراین حرکت می‌چرخد ومی‌پیچد و به‌جلو و عقب و به‌چپ وراست می‌رود تـا به زمین برسد . چنین‌حرکتی هم‌که می‌توان‌آن‌را متداولترین‌حرکت طبیعی دانست ازحرکت یك ماشین پیچیده‌تر است . علاوه براین به‌ندرت ممکن است دوبـرگ حرکت یکسان داشته باشند. چنانچه بخواهیم حرکت‌افتادن برگ را مطالعه کنیم باید هربرگ را کـه می‌افتد جداگانه درنظر بگیریم .

پرسش۲-۱- چه‌نفعی ازمطالعه جزئیات چنین حرکتی عاید ما می‌شود ؟

دراین‌کتاب ما حرکات ساده‌ای را موردبحث قرار می‌دهیم کـه بتوانیم نمونه‌های آنهـا را در آزمایشگاه ایجاد وبررسی کنیم. زیرا حرکات‌پیچیده موجود در طبیعت تـرکیبی از این حرکت‌های ساده هستند .

دراین بخش ، ما حرکت بر روی خط راست (یعنی حرکت یك‌بعدی) را بررسی می‌کنیم و پس از آن‌کـه علت حرکت را بیان کردیم حرکت بر مسیر منحنی (یعنی حرکت دوبعدی) مانند حرکت‌پرتابه‌ها وحرکت برمسیر دایـره‌ای را دربخشهای بعد مورد بحث قرار خواهیم داد. درتمام این‌حرکتها از «مدل ذره‌ای» استفاده خواهیم کرد یعنی جسم متحرك را درصورتی‌که فقط حرکت‌انتقالی داشته باشد درحکم یك ذره می‌گیریم .



شکل ۲-۱- هریك‌ازاندامهای یك‌دونده حرکت پیچیده‌ای‌دارد، ولی‌می‌توان دونده را درمسیرحرکت خود درحکم یك‌ذره‌دانست.

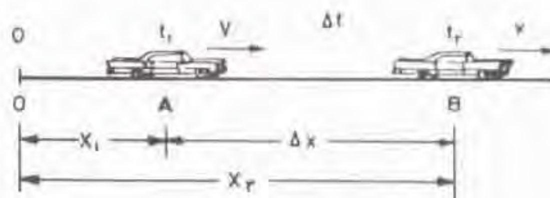
سرعت متوسط ـ می‌دانیدکه خارج قسمت مسافت پیموده شده توسط یك متحرك برزمـان حرکت را سرعت متوسط متحرك گویند یعنی :

$$\text{سرعت متوسط متحرك} = \frac{\text{مسافت پیموده شده}}{\text{زمان حرکت}}$$

دراین‌جا بحث تحلیلی و ریاضی دقیقتری را درباره این سرعت دنبال می‌کنیم .

درنظربگیریم‌که متحرکی ، مثلا یك اتومبیل از مبدأ O روی یك خط راست شروع به حـرکت می‌کند (شکل ۲-۲) و درلحظهٔ t_1 ازنقطه A و در لحظهٔ t_2 ازنقطه B می‌گذرد. اگرفاصله نقاط A و B را از مبدأ O به‌ترتیب بـه x_1 و x_2 نشان دهیم مسافتی‌که متحرك می‌پیماید تا ازنقطه A به‌نقطه B برسد برابر:

$$\Delta x = x_2 - x_1$$



شکل ۲-۲- سرعت متوسط برابر است با خارج قسمت مسافت پیموده شده برزمان

است و زمانی که این فاصله توسط متحرك پیموده می‌شود برابر

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

است. بنابراین سرعت متوسط متحرك بین دونقطه A و B از این رابطه حساب می‌شود:

$$\bar{v} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (۱-۲)$$

مثال - در یك مسابقه شنای ۱۰۰ متر، شناگری طول ۵۰/۰۰ متری استخر شنا را در یك رفت وبرگشت درمدت ۵۶/۰۰ ثانیه پیموده است. اگرمدت رفت ۲۷/۰۰ ثانیه ومدت برگشت ۲۹/۰۰ ثانیه طول‌کشیده باشد سرعت متوسط‌کل این‌شناگر و سرعتهای متوسط او در رفت و برگشت چه اندازه بوده است؟

الف) سرعت متوسط کل‌شناگر:

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۲ \times ۵۰/۰۰m}{۵۶/۰۰s} = ۱/۷۸۶\frac{m}{s}$$

ب) سرعت متوسط شناگر بهنگام رفت:

$$\bar{v}_1 = \frac{۵۰/۰۰m}{۲۷/۰۰s} = ۱/۸۵۲\frac{m}{s}$$

ج) سرعت متوسط شناگر دربرگشت:

$$\bar{v}_2 = \frac{۵۰/۰۰m}{۲۹/۰۰s} = ۱/۷۲۴\frac{m}{s}$$

در اغلب موارد مبدأ سنجش حرکت طوری انتخاب می‌شود که $x_1 = ۰$ باشد دراین صورت $t_1 = ۰$ است ومعادله (۲-۱) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\bar{v} = \frac{x}{t} \qquad (۲-۲)$$

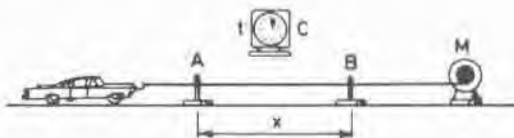
پرسش ۲-۲- واحدهای سرعت راکه با آنها آشنائی دارید نام ببرید.

پرسش ۲-۳- بادردست داشتن سرعت‌متوسط آیا می‌توان مسیرحرکت و وضع متحرك را در هر لحظه مشخص نمود؟

حرکت بـا سرعت ثابت (حـرکت یکنواخت)

متحرکی‌که درزمـانهای مساوی مسافتهای مساوی طی‌کند سرعتش ثابت، یا به عبارت دیگر، حرکتش یکنواخت است. نمونه این‌حرکت درطبیعت‌کم‌است ولی می‌توان درآزمایشگاه آن‌را ایجادوبررسی‌کرد. درشکل(۲-۳)آزمایش ساده‌ای برای‌تحقیق حرکت یکنواخت طرح‌ریزی شده‌است‌که شما هم می‌توانید مشابه‌آن‌را درآزمایشگاه انجام دهید.

یك ماشین سواری‌کوچك ازنوع اسباب بازی روی میز افقی قرار داود و با رشته نخی‌که به‌دور یك قرقره مـی‌پیچد کشیده مـی‌شود. قرقره روی محوریك موتور کوچك‌کـه حرکت آن قابل تنظیم است نصب شده است. حرکت موتور طوری تنظیم می‌شود‌که محورآن یك‌دور درثانیه بزند وقطرقرقره که نخ به‌دورآن پیچیده می‌شود معلوم، مثلا ۲/۵ سانتیمتر است. دونشانه A و B به فاصله‌کم ازیك دیگر درمسیر حرکت گذارده می‌شود و فاصله بین آنهـا، یعنی x با خط‌کش میلیمتری اندازه‌گرفته مـی‌شود. با به‌کار افتادن موتور، مـاشین به‌راه می‌افتد و لحظه‌ای کـه مقابل نشانه A مـی‌رسد کرونومتر به‌کار مـی‌افتد ولحظه‌ای هم‌کـه مقابل



شکل ۲-۳- روش تجربی برای‌اندازه‌گرفتن سرعت یك‌متحرك.

نشانه B می‌رسد کرونومتر متوقف می‌گـردد . در نتیجه زمان t که متحرك فاصله x را می‌پیمایدروی کرونومتر مشخص می‌گردد . بادورکـردن نشانه‌ها ازیکدیگر می‌توان آزمایش را چندبار تکرار ونتایج حاصل را درجدولی یادداشت نمود .

فرض کنیدکه این آزمایش پنج‌بار تکرار شده ونتایج به‌دست‌آمده اندازه‌هائی باشدکه درجدول ۲-۱

جدول ۲-۱

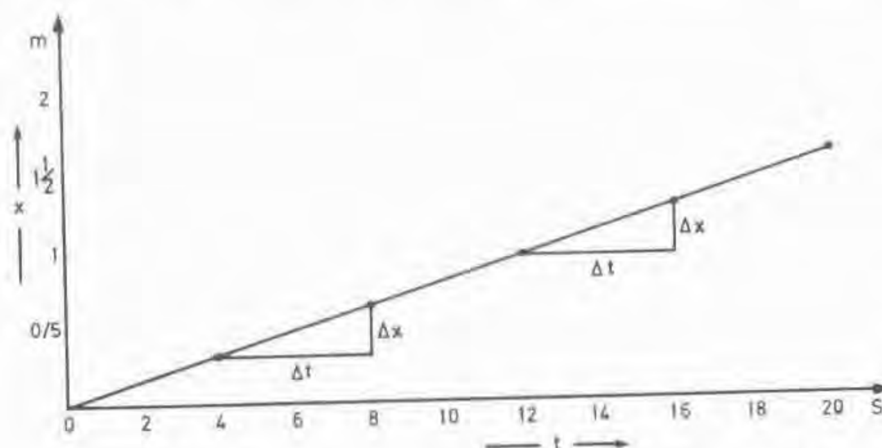
شماره‌ترتیب آزمایشها	مسافت پیموده شده x(m)	زمان‌حرکت t(s)	سرعت‌متوسط حساب شده $\bar{V}\frac{m}{s}$
۰	۰	۰	—
۱	۰/۳۱۴	۴/۰	۰/۰۷۸۵
۲	۰/۶۲۸	۸/۰	۰/۰۷۸۵
۳	۰/۹۴۲	۱۲/۰	۰/۰۷۸۵
۴	۱/۲۵۶	۱۶/۰	۰/۰۷۸۵
۵	۱/۵۷۰	۲۰/۰	۰/۰۷۸۵

نوشته شده‌است . برای پیداکردن رابطهٔ بین x و t بهتر این است کـه نمودار تغییرات این دوکمیت نسبت به‌هم‌رسم‌شود. اگر مقادیرt که درجدول۲-۱ مندرج است روی محور افقی و مقادیـر x روی محور عمود برآن برده شود نقاطی به دست می‌آید که ازوصل‌کردن آنهـا به یکدیگر یك خط راست مطابق شکل (۲-۴) حاصل شود .

این خط ازمبدأ ۰=x و ۰=t نیزمی‌گذرد و نشان می‌دهد که دوکمیت x و t مستقیماً با هـم متناسبند یعنی نسبت$\frac{x}{t}$ مقدار ثابتی است ، این مقدار ثابت‌که درستون‌آخر سمت چپ جدول نوشته شده است مسافتی است‌کـه متحرك در واحد زمان می‌پیماید یا به‌عبارت دیگر سرعت متحرك است که آن را به v نمایش می‌دهیم ، بنابراین

$$v=\frac{x}{t} \qquad (۲-۳)$$

پرسش ۲-۴- می‌دانید $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ شیب این خط است . به‌کمك اعداد مندرج در جدول (۲-۱)نشان



شکل ۲-۴- نمودار تغییرات x و t که در آزمایش حرکت اتومبیل به دست آمده است .

دهیدکه این شیب مقدار ثابتی است .

بدنیست یادآور شویم که آزمایش بالا ، آزمایشی ساده برای نشان دادن یک قانون ساده مکانیکی است و منظور این است‌که استفاده ازروش علمی برای تحقیق در بارهٔ یک پدیده بازگو شود .

پرسش ۲-۵- روش علمی که درآزمایش مورد بحث به‌کار رفته چگونه است ؟

معادلهٔ حرکت یکنواخت- اگرسرعت‌حرکت‌معلوم باشدمسافتی که‌متحرک درزمان t می‌پیماید از رابطه ۲-۴ که معادلهٔ حرکت یکنواخت است حساب می‌شود

$$x = v \cdot t \qquad (۲-۴)$$

مثال - هواپیمائی با سرعت ثابت ۷۲۰ $\frac{km}{h}$ درحرکت‌است . چه‌مسافتی را این هواپیما در مدت ۵ دقیقه می‌پیماید .

- داریم

$$x = v \cdot t = ۷۲۰ \frac{km}{h} \times \frac{۵}{۶۰} h = ۶۰ km$$

پرسش ۲-۶ - درحرکت یکنواخت ، زمان حرکت را ازچه رابطه‌ای حساب می‌کنید .

سرعت و تندی - درگفتگوهای روزانه «سرعت» و «تندی» اغلب به صورت دو کلمهٔ مترادف به‌کار می‌روند، ولی با بیانی دقیقتر کلمهٔ «سرعت» را چنانکه می‌دانید به‌عنوان یک‌کمیت اسکالر و کلمهٔ «تندی» را به عنوان یک کمیت برداری به‌کار می‌بریم.

پرسش ۲-۷- کمیتهای اسکالرو برداری را با سابقه‌آشنائی که درباره آنها دارید تعریف‌کنید.

کلمه « سرعت » فقط معرف‌اندازه تندی‌است وجهت وراستای حرکت را مشخص نمی‌کند . در حرکت برروی خط راست ، سرعت و تندی ازلحاظ مقدار با هم برابرند و راستای آنها نیز یکی است ولی درحرکت‌برمسیرمنحنی، اگرهم اندازه «سرعت» ثابت باشد « تندی » را نباید ثابت دانست زیرا راستای آن‌تغییرمی‌کند. با وجوداین اگرمتحرکی با سرعت ثابت برروی خط راست حرکت کند و جهت حرکت‌آن مشخص باشد بهتر این است‌که اصطلاح « تندی » را به‌کار بریم ولی اگرمتحرک برمسیر منحنی یا برروی خط راست حرکت‌کند ولی اشاره‌ای به جهت حرکت آن نشود می‌توانیم اصطلاح « سرعت » را به‌کار بریم .

دیمانسیون سرعت (یاتندی) - دیدیم که سرعت خارج‌قسمت مسافت برزمان است، یعنی خارج‌قسمت کمیت « طول » بر کمیت « زمان » . درفیزیک چنین متداول است‌که می‌گویند سرعت دارای دیمانسیون طول برزمان است . اگرطول را به L و زمان را به T نمایش‌دهیم دیمانسیون (رابطهٔ ابعادی) سرعت به‌صورت $\frac{L}{T}$ یا LT^{-1} نوشته می‌شود . خاصیت دیمانسیون‌این است‌که نشان می‌دهد یک‌کمیت فرعی مثلا سرعت ، چگونه با کمیتهای اصلی مانند طول و زمان ارتباط دارد .

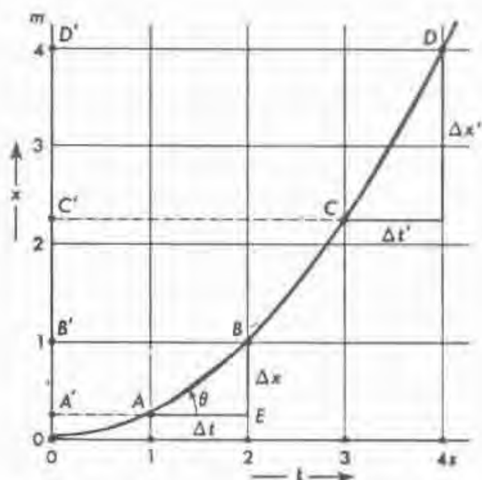
هر کمیت فرعی‌که درفیزیک بکارمی‌رود دارای دیمانسیونی است‌که رابطهٔ آن کمیت را باکمیتهای

اصلی[1] مشخص می‌کند . شما ضمن بررسی هریک از این کمیتها دیمانسیون آن را نیز به‌آسانی می‌توانید پیدا کنید .

تندی لحظه‌ای ـ وقتی که تندی یك متحرك ثابت نباشد یعنی با گذشت زمان تغییر کند بدیهی است متحرك درزمانهای مساوی مسافتهای مساوی نخواهد پیمود . دراین‌صورت برای متحرك « تندی‌متوسط» ویا « تندی لحظه‌ای » درنظر گرفته می‌شود . تندی متوسط‌مانندسرعت‌متوسط از رابطهٔ $\bar{v}=\frac{x_2-x_1}{t_2-t_1}$ حساب می‌شود ، ولی با این تندی موقعیت متحرك مشخص‌نمی‌گردد. « تندی لحظه‌ای » یعنی تندی‌که متحرك درهرلحظه از زمان دارد . چون یك لحظه دوام ندارد متحرك نمی‌تواند در یك لحظه مسافتی را طی کند بنابراین تندی‌لحظه‌ای مفهوم تندی متحرك در هرنقطه ازمسیر را پیدا می‌کند و محاسبهٔ آن با روش خاص ریاضی انجام می‌شود .

درنظر بگیریم که آزمایشی با ماشین کوچك شکل (۲ـ۳) انجام گرفته ونموداری مطابق شکل ۲ـ۵ به دست‌آمده است . نقاط A' و B' و C' و... که روی محور عمودی نمایش داده شده‌اند به‌ترتیب معرف فواصل ماشین از مبدأ O درثانیه‌های متوالی هستند . چون فاصله این نقاط از یکدیگر مساوی نیست تندی متحرك نیز ثابت نیست .

اینك تندی متوسط ماشین را در فاصلهٔ AB حساب می‌کنیم. این تندی چنانکه گفتیم برابراست با



شکل ۲ـ۵ ـ نمودار مسافت ـ زمان برای متحرکی که با تندی متغیر حرکت می‌کند .

$$\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

دراینجا Δx برابراست با $A'B'$ و Δt زمانی است که مسافت Δx پیموده شده است (طبق شکل ازیك ثانیه تا دوثانیه) . Δx و Δt دوضلع عمود برهم مثلث قائم‌الزاویه AEB هستند و نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ شیب خط AB است که برابر $tg\theta$ است . اگرنقطه B را به A نزدیك و نزدیکتر کنیم اندازه‌های Δx و Δt کوچك وکوچکتر می‌شوند . وقتی که Δt به صفرخیلی نزدیك می‌شود خارج قسمت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ به‌تندی متحرك درنقطه A خیلی‌نزدیك می‌گردد ودرحد(یعنی وقتی که Δt صفر می‌شود و B بر A منطبق می‌گردد)

۱ـ در دستگاه واحدهای بین‌المللی (SI)، هفت‌کمیت به‌عنوان‌کمیتهای‌اصلی انتخاب‌شده‌است که عبارتند ازطول ، جرم ، زمان ، شدت جریان ، شدت نور ، دما ، مل (ملکول گرم). این کمیتها درضمیمهٔ آخر کتاب تعریف شده‌اند .

به‌نام « تندی لحظه‌ای » نامیده می‌شود . بنابراین

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{تندی لحظه‌ای} \qquad (۴-۲)$$

($\lim$ علامت حد است)

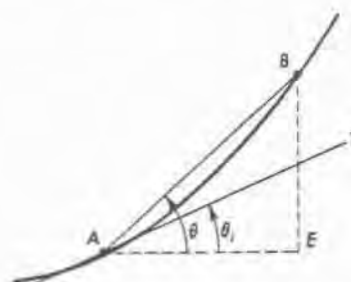
این حد را بنابه‌قرارداد ریاضی به $\frac{dx}{dt}$ نمایش می‌دهند پس :

$$\boxed{v = \frac{dx}{dt}} \qquad (۵-۲)$$

dx و **dt** هردو بینهایت کوچکند وخارج‌قسمت $\frac{dx}{dt}$ دراصطلاح ریاضی حدنسبت نموتابع x به‌نمو متغیر t است‌وقتی که Δt به‌سمت صفرمیل کند. میدانید که این حد مشتق x نسبت t است . بنابراین تندی لحظه‌ای مشتق مسافت نسبت به‌زمان است.

پرسش ۲-۸- چون dx و dt هردو بینهایت کوچکند آیا لازم است v نیز بینهایت‌کوچك باشد؟

درشکل ۲-۶ به‌طور واضـح نشان داده شده است که وقتی نقطه B به A نزدیك می‌شود زاویه θ تغییر می‌کند و درحـد یعنی وقتی کـه $\Delta t = 0$ می‌گردد خط AB درنقطه A به‌صورت مماس‌برمنحنی درمی‌آید و می‌توانیم بنویسیم :



شکل ۳-۶- تندی لحظه‌ای برابر $tg\theta_1$ است .

$$\boxed{v = \frac{dx}{dt} = tg\theta_1} \qquad (۶-۲)$$

یعنی : تندی لحظه‌ای درهرلحظه t برابرشیب خط مماس برمنحنی « مسافت ـ زمان » است و این خود تعبیر هندسی مشتق است .

حرکت شتابدار

وقتی که متحرکی دارای تندی ثابت نباشد حرکت آن شتابدار است .

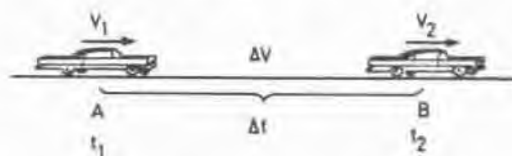
شتاب ، چنانکه مـی‌دانید ، تغییر تندی در واحد زمان است . یعنی :

$$\text{شتاب} = \frac{\text{تغییر تندی}}{\text{مدت تغییر تندی}}$$

اتومبیل به هنگام سرعت‌گرفتن دارای شتاب مثبت و در وقت پائین‌آوردن سرعت به‌قصدایستادن دارای شتاب منفی است . دیمانسیون شتاب $\frac{\frac{L}{T}}{T}$ یا $\frac{L}{T^2}$ و یا LT^{-2} و واحد آن در دستگاه بین‌المللی واحدها $\frac{m}{s^2}$ است .

شتاب متوسط ـ متحرکی، مثلا یك اتومبیل را در نظر بگیریم که روی خط راست AB بـا شتاب در حرکت است (شکل ۲-۷) .

اگر درلحظهٔ t_1 که اتومبیل ازنقطه A می‌گذرد



شکل ۲-۷- حرکت شتابدار یك اتومبیل در مدت‌معین

دارای تندی v_1 و درلحظهٔ t_2 که از B مـی‌گذرد دارای تندی v_2 بـاشد تغییر تندی آن $\Delta v = v_2 - v_1$ است که درمدت $\Delta t = t_2 - t_1$ صورت گرفته است بنابراین اندازه شتاب متوسط متحرك دراین مدت برابر با

$$\text{اندازه شتاب‌متوسط}\ \bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (۶-۲)$$

پرسش ۲-۹ ـ چه راههائی برای شتاب دار کردن حرکت یك‌متحرك بین دونقطه ازمسیر ازحرکت پیشنهاد می‌کنید ؟

برای این‌که مفهوم شتاب متوسط بهتر درك شود نمودار تغییرات تندی متحرك را با زمان ، یا به‌عبارت دیگـر نمودار «تندی ـ زمان» را بـرای متحرك مورد نظر رسم می‌کنیم . فرض‌کنید در یك آزمایش به‌کمك سرعت سنج اتومبیل ، تندی‌لحظه‌ای اتومبیلی که با حرکت شتاب‌دار شروع بـه حرکت کرده است درلحظات مختلف (مثلا ۲ثانیه به ۲ثانیه) اندازه‌گیری ونتایج حاصل درجدول ۲-۲ ثبت‌شده است . شکل ۲-۸ نمودار تغییرات تندی این‌اتومبیل را در مدت ۶ ثانیه نشان می‌دهد . شتاب متوسط متحرك دراین مدت برابر است با :

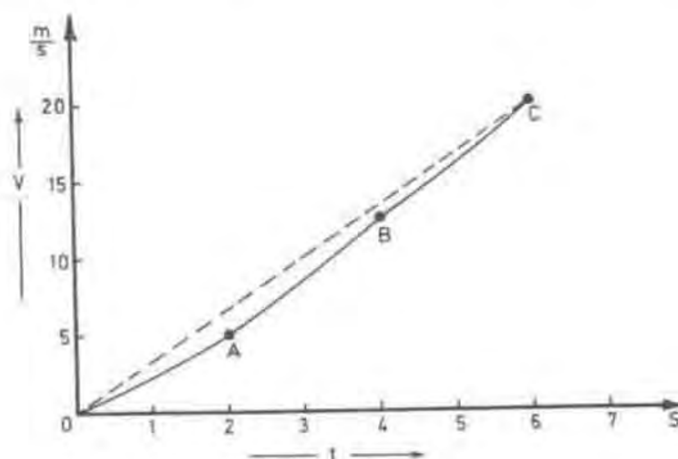
$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(۱۸\frac{m}{s}) - (۰\ \frac{m}{s})}{(۶^s) - (۰^s)} = ۳\frac{m}{s^2}$$

درصورتی‌که شتاب متوسط بین ۰ و ۲ ثانیه یا بین ۲ و ۴ ثانیه و ۴ و ۶ ثانیه متفاوت است . یعنی :

$$\bar{a}_{۰ و ۲} = \frac{(۵\ \frac{m}{s}) - (۰\ \frac{m}{s})}{(۲^s) - (۰^s)} = ۲/۵\frac{m}{s^2}$$

جدول ۲-۲

زمان به‌ثانیه	تندی به متر برثانیه	تندی به کیلومتر درساعت
۰	۰	۰
۲	۵	۱۸
۴	۱۲/۵	۴۵ ~
۶	۱۸	۶۵ ~



شکل ۲-۸

$$\bar{a}_{۲,۴}=\frac{(۱۲/۵\frac{m}{s})-(۵\frac{m}{s})}{(۴^{s})-(۲^{s})}=۳/۷۵\frac{m}{s^{۲}}$$

$$\bar{a}_{۴,۶}=\frac{(۱۸\frac{m}{s})-(۱۲/۵\frac{m}{s})}{(۶^{s})-(۴^{s})}=۲/۷۵\frac{m}{s^{۲}}$$

پرسش ۲-۱۰- شتاب متوسط این حرکت بین لحظات ۲ ثانیه و ۶ ثانیه چه اندازه است ؟

بدیهی است $\bar{a}=\frac{\Delta v}{\Delta t}=$ شیب خط راست OC است ونشان می‌دهد که اگرمتحرك با شتاب ثابتی حرکت کند نمودارتندی-زمان آن یك خط راست است.

پرسش ۲-۱۱- نمودار تندی ـ زمان متحرکی که باتندی ثابت حرکت می‌کند به‌چه‌صورت است؟

شتاب‌لحظه‌ای ـ شتاب لحظه‌ای یعنی شتاب در هر لحظه اززمان یا به‌عبارت دیگر شتاب متحرك درهر نقطه از مسیرحرکت . این شتاب مانند تندی لحظه‌ای به روش خاص ریاضی حساب می‌شود وبرای این منظور باید در رابطهٔ $\bar{a}=\frac{\Delta v}{\Delta t}$ ، زمان Δt را بینهایت کوچك بگیریم ، یعنی Δt را به‌سمت صفر میل دهیم . دراین‌صورت Δv نیز به‌سمت صفرمیل می‌کند و کسر $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ به‌سوی حدی میل می‌نماید کـه اندازهٔآن شتاب لحظه‌ای متحرك درهر نقطه ازمسیر حرکت است یعنی :

$$\text{شتاب لحظه‌ای}\; a=\lim_{\Delta t\to ۰}\frac{\Delta v}{\Delta t}\qquad (۷-۲)$$

این حد را بنـا به قرارداد ریاضی به $\frac{dv}{dt}$ نمایش می‌دهند . بنابراین

$$a=\frac{dv}{dt}\qquad (۸-۲)$$

چون $\frac{dv}{dt}$ نمایش مشتق تابع v نسبت به متغیر t است اندازهٔ شتاب لحظه‌ای a برابر است با اندازهٔ مشتق تندی v نسبت به زمان t .

پرسش ۲-۱۲- با رسم یك شکل نشان‌دهید که شتاب لحظه‌ای در هـرلحظهٔ t برابر شیب خط مماس برنمودار تندی ـ زمان است .

مثال ـ تندی متحرکی برحسب $\frac{m}{s}$ طبق رابطهٔ $v=۱۰\sqrt{t}$ با جذر زمـان t متناسب است شتاب این حرکت را درلحظهٔ $t=۱۰^{s}$ ثانیه حساب‌کنید .

ـ رابطهٔ $v=۱۰\sqrt{t}$ را به‌صورت $v=۱۰t^{\frac{۱}{۲}}$ می‌نویسیم . شتاب لحظه‌ای مشتق این رابطه است یعنی :

$$a=\frac{dv}{dt}=۱۰\times\frac{۱}{۲}t^{\frac{۱}{۲}-۱}=۵t^{-\frac{۱}{۲}}=\frac{۵}{\sqrt{t}}$$

به ازاء $t=۱۰^{s}$ داریم :

$$a=\frac{۵}{\sqrt{۱۰}}=\frac{۵\sqrt{۱۰}}{۱۰}\approx\frac{۵}{۱۰}\times ۳/۱۶=۱/۵۸\frac{m}{s^{۲}}$$

حرکت برروی خط راست با شتاب ثابت

اگرسرعت[1] متحرکی درزمانهای مساوی‌متوالی یکسان تغییر کند شتاب متحرك ثابت است . نمودار

۱ـ چون درحرکت برروی خط راست تندی وسرعت ازلحاظ مقدار برابرند درصورتی‌که جهت حرکت منظور نشود می‌توان اصطلاح سرعت را بـه جای تندی به‌کاربرد و درهرحال سرعت اندازه بردار تندی است .

«سرعت ـ زمان» این حرکت ، چنانکه گفتیم ، خط راستی است که شیب آن برابر اندازه شتاب متحرك است . اگـر سرعت متحرك در حال افزایش باشد حرکت تندشونده وشتاب مثبت است ، مانندهواپیمائی که روی بانـد پرواز فرودگاه سرعت مـی گیرد تا به پرواز درآید . اگـر سرعت متحرك درحال کاهش باشد حرکت کندشونده وشتاب منفی است ، مانند حرکت هواپیمای درحال پروازی که روی باند فرودگاه می‌نشیند تا متوقف شود . چون حرکت برروی خط راست صورت می گیرد بردارهای تغییرمکان و تندی وشتاب هرسه در راستای این خط هستند .

پرسش ۲-۱۳ ـ درحرکت با شتاب ثابت آیا تفاوتی بین شتاب لحظه‌ای وشتاب متوسط وجود دارد؟ اگر در مبدأ زمان (که معمولا آن را لحظهٔ $t_\circ = \circ$ می گیریم) سرعت متحرك را به $v_\circ$ و در لحظهٔ t سرعت آن را به v نمایش دهیم شتاب ثابت متحرك از رابطهٔ زیر حساب می‌شود

$$a = \frac{v - v_\circ}{t - t_\circ} = \frac{v - v_\circ}{t} \qquad (۹-۲)$$

در حرکت تند شونده v از $v_\circ$ بزرگتر و a مثبت است ولـی در حرکت کند شونـده v از $v_\circ$ کوچکتر وشتاب منفی است . $v_\circ$ را «سرعت اولیه» متحرك می نامند .

مثال ۱ـ اتومبیلی با شتاب ثابت ازحال سکون به حرکت درمـی آید و پس از ۲ ثانیه سرعتش بـه $۱۸\frac{km}{h}$ مـی رسد شتاب حـرکت این اتومبیل را حساب کنید .

ـ چون اتومبیل از حال سکون بـه حرکت درمی آیـد سرعت اولیه آن (یعنی $v_\circ$) صفر است سرعت $۱۸\frac{km}{h}$ برحسب متر بـرثانیه برابر است با $\frac{۱۸ \times ۱۰۰۰^m}{۳۶۰۰^s} = ۵\frac{m}{s}$ بنابراین :

$$a = \frac{v - v_\circ}{t} = \frac{(۵\frac{m}{s}) - (\circ\frac{m}{s})}{۲^s}$$

$$= \frac{۵\frac{m}{s}}{۲^s} = ۲/۵\frac{m}{s^۲}$$

مثال ۲ـ یك هواپیمای بوئینگ ۷۴۷جمبوجت با سرعت $۱۶۰\frac{m}{s}$ روی بانـد فرودگاه می‌نشیند و ۳۲ ثانیه طول می کشد تا کاملا متوقف شود . اگر حرکت هواپیما با شتاب ثابت کند شود شتاب آن را حساب کنید .

ـ سرعت اولیه هواپیما $v_\circ = ۱۶۰\ \frac{m}{s}$ و سرعت آخری آن $v = \circ$ و مدت حرکت $t = ۳۲^s$ است بنابراین $a = \frac{v - v_\circ}{t} =$

$$\frac{(\circ\frac{m}{s}) - (۱۶۰\frac{m}{s})}{۳۲^s} = -\frac{۱۶۰\frac{m}{s}}{۳۲^s} = -۵\frac{m}{s^۲}$$

علامت منفی نشان می‌دهد که بردار شتاب در خلاف جهت بردار تندی است ، به عبارت دیگـر حرکت کند شونده است .

شکل-۲ ۹- بوئینگ ۷۴۷ جمبوجت یکی از بزرگترین هواپیماهای مسافربری جهان



محاسبهٔ سرعت لحظه‌ای و مسافت پیموده شده ـ سرعت لحظه‌ای متحرك ، در حرکت بـر روی خط راست ، وقتی‌که شتاب ثابت است از رابطهٔ (۲-۹) حساب می‌شود .

$$v = at + v_0 \qquad (10-2)$$

مسافت x را که متحرك درمدت t مـی‌پیماید از رابطه زیر می‌توان حساب‌کرد :

$$x = \bar{v}\, t$$

$\bar{v}$ سرعت متوسط متحرك است کـه برابر میانگین عددی v و v_0 است یعنی :

$$\bar{v} = \frac{v + v_0}{2}$$

بنابراین

$$x = \frac{v + v_0}{2} t \qquad (11-2)$$

روابط (۲-۱۰) و (۲-۱۱) دو رابطه‌مهم و اساسی هستندکه توسط آنها سرعت لحظه‌ای متحرك و مسافت پیموده شده پس ازگذشت زمان t حساب می‌شود. ازترکیب این دورابطهٔ اساسی‌دو رابطه‌دیگر بین سرعت ومسافت وزمان به دست می‌آید که در محاسبهٔ سرعت یا مسافت نیز زیاد بکار می‌روند :

اگر در رابطه (۲-۱۱) به جای v طرف‌دوم رابطهٔ (۲-۱۰) را بگذاریم خواهیم داشت:

$$x = \frac{(at + v_0) + v_0}{2} \cdot t = \frac{at^2 + 2v_0 t}{2}$$

و یا

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t \qquad (12-2)$$

این رابطه وقتی به‌کار می‌رود کـه شتاب و سرعت اولیه و زمان حرکت معین باشند وبخواهیم مسافت پیموده شده را حساب کنیم . اگر در رابطه (۲-۱۱) به‌جای t معادل‌آن‌را ازرابطه $t = \frac{v - v_0}{a}$ قرار دهیم خواهیم داشت :

$$x = \left(\frac{v + v_0}{2}\right)\left(\frac{v - v_0}{a}\right) = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

و یا

$$v^2 - v_0^2 = 2ax \qquad (13-2)$$

به‌کمك این رابطه مسافت طی شده از روی سرعتهای اولی و آخری و شتاب حرکت حساب می‌شود .

پرسش ۲-۱۴ـ اگرمتحرك از حال سکون با شتاب ثابت شروع به‌حرکت کند یعنی سرعت اولیه آن (v_0) صفرباشد معادلات (۲-۱۰) و (۲-۱۱) و (۲-۱۲) و (۲-۱۳) به‌چه صورت درمی‌آیند؟

مثال ۱ـ یك هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ روی باند پرواز فرودگاه با شتاب ثابت $4\ \frac{m}{s^2}$ بـه راه می‌افتد و ۴۰ ثانیه طول مـی‌کشد تا از زمین بلند شود مطلوبست :

الف) سرعت هواپیما در لحظهٔ بلند شدن از زمین .

ب) مسافتی‌که روی باند پرواز می‌پیماید .

ـ الف) سرعت اولیه هواپیما $v_0 = 0$ است

به‌ازاء $a=4\frac{m}{s^2}$ و $t=40s$ ، سرعت هواپیما درلحظهٔ بلند شدن برابر است با

$$v=at+v_0=\left(4\frac{m}{s^2}\right)\left(40s\right)$$
$$+\left(0\frac{m}{s}\right)=160\frac{m}{s}$$

ب) مسافتی که هواپیما روی زمین‌می‌پیماید برابر است با :

$$x=\frac{1}{2}at^2+v_0t=\frac{1}{2}\left(4\frac{m}{s^2}\right)\left(40s\right)^2$$
$$+0=3200m$$

یا ۳/۲ کیلومتر

مثال ۲- ترنی که باسرعت $8/0\frac{m}{s}$ روی‌ریل راست و افقی درحرکت است دراثر افزایش نیروی موتور شتاب می‌گیرد و باشتاب ثابت $0/20\frac{m}{s^2}$ مسافت ۱/۵۰۰ کیلومتر را می‌پیماید . سرعت آن درپایان این مسافت چه اندازه است ؟

ـ سرعت‌اولیه ترن $v_0=8/0\frac{m}{s}$ ومسافت پیموده شده $x=1500m$ و شتاب حرکت $a=0/20\frac{m}{s^2}$ است . سرعت آخری ترن‌ازرابطهٔ زیر حساب می‌شود

$$v^2=2ax+v_0^2$$

یا

$$v^2=2\times\left(0/20\frac{m}{s^2}\right)\left(1500m\right)$$
$$+\left(8/0\frac{m}{s}\right)^2=664\left(\frac{m}{s}\right)^2$$

وازآنجا

$$v=25/77\frac{m}{s}$$

یکی از مهمترین حرکتهای با شتاب ثابت « حرکت سقوط آزاد » اجسام است . « سقوط‌آزاد» یعنی حرکت یك‌جسم درنزدیکی سطح‌زمین درصورتی که بجز نیروی جاذبهٔ زمین نیروی دیگری برجسم وارد نشود . به‌عبارت دیگر اگر جسمی در اثر وزن‌خود سقوط می‌کند ، اثرمقاومت هوا برآن ناچیز باشد . درفیزیك سال اول با این حرکت آشنا شده‌اید ، در این‌جا باشرح تجربی بیشتری‌آن‌را دنبال‌خواهیدکرد.

سقوط آزاد اجسام

سقوط اجسام ازقرنها پیش ذهن انسان‌متفکر را بـه خود مشغول داشته است . ارسطو فیلسوف یونانی (۳۸۴-۳۲۲ پیش‌ازمیلاد مسیح) معتقد بود کـه اجسام سنگینتر تندتـر از اجسام سبکتر سقوط می‌کنند . این قضاوت بامشاهدات عادی ، که مثلا یك برگ درخت کندتر از یـك قطعه سنگ سقوط می‌کند مطابقت داشت. قریب دوهزارسال طول‌کشید تانظریه‌ای برخلاف عقیده ارسطو تولد یافت .

درسال ۱۵۹۰ میلادی گالیله نظریهٔ ارسطورا دربارهٔ سقوط اجسام ردکرد و اظهـار داشت : اگر مشاهده می‌شودکه اجسام با سرعتهای متفاوت‌درهوا سقوط می‌کنند علت این‌تفاوت وجود هوا ومقاومت آن درمقابل حرکت اجسام است . اگراثر مقاومت هوا حذف شود همهٔ اجسام بزرگ وکوچك ، چه‌سبك وچه‌سنگین بایك شتاب سقوط می‌کنند . گالیله برای اثبات نظرخود ، گلوله هـای کوچك به سنگینیهای متفاوت را باهم ازبالای برج معروف پیزا رهاکرد. چون اثرمقاومت هوا برحرکت این‌اجسام ناچیز بود باهم به سطح زمین رسیدند . شما هم بایك آزمایش ساده می‌توانید این مطلب را تاییدکنید : یك صفحه

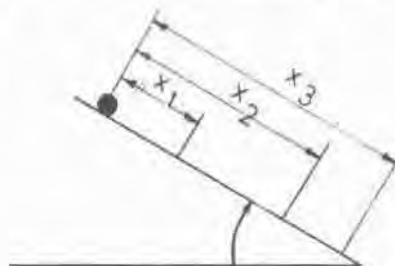
کاغذ و یك جسم کوچك سنگین مثلا یك تکه سنگ را باهم ازیك نقطه رها کنید سنگ خیلی زودتر ازصفحه کاغذ به‌زمین می‌رسد ولی اگر صفحه کاغذ را مچاله کرده به شکل گلوله کوچکی درآورید و تکه سنگ و گلوله کاغذ را باهم ازهمان نقطه رها کنید هردو تقریباً باهم به سطح زمین می‌رسند .

آزمایشهای گالیله دربارهٔ سقوط اجسام نه‌تنها خط بطلان برعقاید فلسفی نادرست آن زمان کشید بلکه نشان داد بهترین روش برای کشف قوانین طبیعت «روش تجربی» است ، در زمان گالیله امکان اندازه گیری‌های مستقیم و دقیق روی حرکت تند سقوط اجسام وجود نداشت به همین جهت گالیله برای پی بردن به‌قانون سقوط آزاد اجسام از حرکت یك گلوله برسطح شیب‌دار که نسبت به‌سقوط آزاد کندتر است استفاده کرد . اودلیل انتخاب سطح شیب دار را با این فرضیه توجیه کرد : اگر جسمی که سقوط آزاد می‌کند شتاب ثابتی داشته باشد گلوله‌ای‌هم که روی سطح صیقلی شیب‌دار حرکت می‌کند (شکل ۲-۱۰) نیز دارای شتاب ثابت است با این تفاوت که شتاب کمتری دارد . بنابراین اگر برای جسمی که سقوط آزاد می‌کند $\frac{x}{t^2}$ (نسبت فاصله پیموده شده به‌مجذور زمان) مقدار ثابتی باشد این نسبت برای گلوله‌ای هم که ازبالای سطح شیب‌دار بدون اصطکاك ازحال سکون به‌حرکت درمی‌آید ومسافتهای مختلف را درزمانهای متفاوت می‌پیماید نیز مقدار ثابتی است یعنی

$$\frac{x_1}{t_1^2}=\frac{x_2}{t_2^2}=\frac{x_3}{t_3^2}=\ldots\ldots=Cte$$

پرسش ۲-۱۵- این نسبت ثابت چیست ؟

گالیله در یك سری آزمایشهای دیگر شیب سطح را تغییر داد و دریافت وقتی که زاویه شیب سطح بزرگ می‌شود نسبت $\frac{x}{t^2}$ نیز بزرگ می‌شود ، یعنی شتاب حرکت افزایش می‌یابد ولی این نسبت برای هریك اززاویه‌های شیب بازهم مقدار ثابتی است که بستگی به‌مسافتی که گلوله می‌پیماید ندارد[1]



الف - نسبت $\frac{x}{t^2}$ مقدار ثابتی است



ب - وقتی که شیب سطح افزایش می‌یابد نسبت $\frac{x}{t^2}$ نیز افزایش می‌یابد . وقتی که زاویهٔ شیب سطح به 90° می‌رسد جسم در راستای قائم سقوط آزاد می‌کند.

شکل ۲-۱۵- آزمایش باسطح شیب‌دار گالیله

۱- برای این که گلوله روی یك خط راست حرکت کند کافی است که درشیار مستقیم مناسبی که سرتاسر یك تخته‌دراز تعبیه می‌شود وسطح این شیار کاملا صیقلی است حرکت نماید .

درآخر گالیله چنین استدلال کرد : درحالت‌ویـژه‌ای که زاویهٔ شیب ۹۰ درجه می‌شود گلوله درراستای قائم پایین می‌افتد و این همان حالت «سقوط آزاد» جسم است ، براساس این استدلال نسبت $\frac{x}{t^2}$ در این حالت بازهم ثابت می‌ماند (هرچند گالیله نتوانست بگوید که مقدار عددی این نسبت چیست) .

پرسش ۲-۱۶- به نظرشما چه‌اشکالی در کار آزمایش گالیله بودکـه به‌جای ادامهٔ انـدازه‌گیری به‌استدلال متوسل‌شد ؟

امروزه باپیشرفت دانش وفن ، مطالعهٔ سقوط اجسام آسان شده است وبه راههای مختلفی صورت می‌گیرد . شکل ۲-۱۱ عکسی است که بـه هنگام سقوط آزاد دوگلوله به وزنهای متفاوت با عکاسی



شکل ۲-۱۱- نمایش سقوط آزاد دوگلوله به وزنهای مختلف که با عکاسی استروبوسکپی گرفته شده است .

استروبوسکپی۱ گرفته شده است . دوگلوله باهم‌بدون سرعت اولیه رها شده‌اند وزمان بین هردو تصویر متوالی $\frac{1}{30}$ ثانیه است .

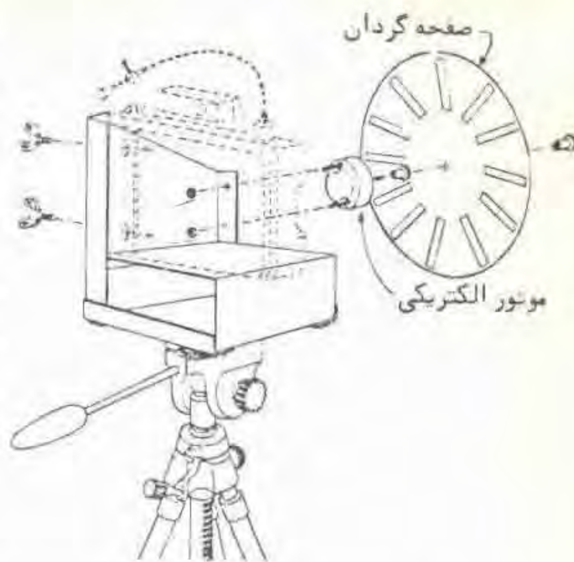
عکاسی استروبوسکپی نظیر عکاسی معمولی است جـز این کـه منبع نـور ، منحصراً یك لامپ استروبوسکپی است .

درمدت‌عکس‌برداری‌دیافراگم دوربین بازاست وآزمایش دراتاق تاریك انجام می‌شود تانوری کـه جسم متحرك را روشن می‌کند منحصراً نـور حاصل ازلامپ استروبوسکپی باشد . این لامپ آذرخشهای (فلاشهای) درخشانی تولید می‌کندکه می‌توان‌تعداد آنها را درثانیه به‌دلخواه تنظیم کرد . چون مـدت درخشیدن هر آذرخش فقط درحدود ده‌میلیونیم ثانیه ($10\times10^{-6}s$) است حـرکت جسمی کـه سقوط می‌کند به‌صورت یك رشته عکسهای مجزا ومتوالی برروی صفحهٔ عکاسی ظاهر می‌شود وتعداد عکسها درهرثانیه برابر تعداد آذرخشها درثانیه است .

پرسش ۲-۱۷- آیا با این عکسهای متوالـی می‌توان قانون سقوط‌آزاد را بدست‌آورد .

یك نوع دیگر دستگاه عکاسی استروبوسکپی متداول است‌که در آن به‌جای لامپ استروبوسکپی ازیك قرص شکاف‌دارکه جلوعدسی دستگاه عکاسی میچرخد استفاده می‌شود . سرعت دوران قـرص شکاف‌دار قابل تنظیم است وهربارکه یکی ازشکافها جلوعدسی قرار می‌گیرد نور بازتابیده از روی‌جسم متحرك وارد دستگاه عکاسی می‌شود وصفحه حساس عکاسی را متأثر مـی‌کند . آزمایش در اتاق تاریك صورت می‌گیرد و فقط جسم متحرك روشن می‌شود

Stroboscopic photography-1



شکل ۳-۱۳- دستگاه عکاسی استروبوسکپی

ودرتمام مدت‌عکاسی‌دیافراگم عدسی بازاست، طرح ساده‌ای ازاین‌نوع دستگاه درشکل۲-۱۲ نشان داده شده است .

وقتی‌که یك‌گلوله چوبی ویك گلوله فولادی باهم ازیك ارتفاع درهوا رها می‌شوند آزمایش‌دقیق نشان می‌دهد که گلوله چوبی اندکی ازگلوله‌فولادی عقب‌می‌ماند وهرچه‌ارتفاع سقوط بیشتر باشد عقب ماندن گلولـه چوبی بیشتر است . علت ، چنانکه گفتیم، وجود اصطکاك هواست که دربخش ۵ دربارهٔ آن‌گفتگو خواهیم‌کرد . هرچه جرم حجمی‌جسم‌کمتر باشد اثرمقاومت هوا برآن محسوس‌تر است : مثلا اجسامی مانند پر مرغ یا برگ درخت کـه سطح تماسشان با ملکولهای هوا زیاد است به‌آرامـی در هوا سقوط می‌کنند .

در جائی که هوا نباشد یك پـر مرغ و یك سکه هر دو با یك شتاب سقوط می‌کنند. این واقعیت را می‌توان بایك‌آزمایش ساده طبق شکل (۲-۱۳) نشان داد : یك پرمرغ ویك‌سکه فلزی درون لـوله شیشه‌ای است . وقتی‌که هوای درون لوله خالـی شود ولوله را برگردانندپرمرغ‌وسکه باهم‌به‌ته لوله سقوط می‌کنند ولی هنگامی‌که لوله پر ازهـوا است پرمـرغ خیلی دیرتر از سکه به ته لوله مـی‌رسد . درجائی که هوا نیست همهٔ اجسام با شتاب یکسان سقوط می‌کنند .

درسال ۱۹۷۰ میلادی یـکی از فضانوردان امریکائی به‌نـام دیوید اسکات[1] در سطح‌کـرهٔ ماه

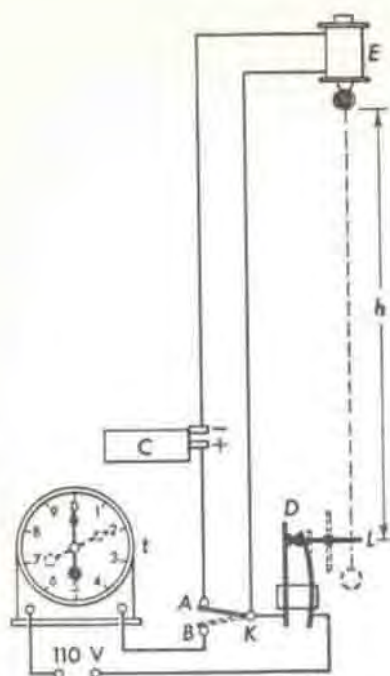


شکل ۲-۱۳- یك سکهٔ فلزی ویك‌پرمرغ درخلاً با هم سقوط می‌کنند

1- David R. Scott

از ارتفاع معینی یك‌چکش ویك پرمرغ را با هم رها کرد ومیلیونها نفردرزمین به‌وسیلهٔ تلویزیون مشاهده کردندکه چکش وپرمرغ درکنار هم سقوط‌کرده و با هم به‌سطح ماه رسیدند . چون‌کرهٔماه فاقـد آتمسفر است می‌توان گفت که‌آزمایش اسکات در خلاً کامل انجام‌گرفته است .

تحقیق قانون سقوط‌آزاد با آزمایش- شکل۲-۱۴ طـرح یکـی از آزمایشهای متعددی را کـه در تحقیق قـانـون سقوط آزاد اجسام بکار رفته است نشان می‌دهد. دراین‌آزمایش‌گلولهٔ فولادی کوچکی‌از ارتفاعهای‌مختلف سقوط می‌کند و زمان سقوط آن برای هرمسافت اندازه‌گرفته می‌شود . چون به‌علت کوچك بودن ارتفاعهای سقوط ، زمانهائی‌که دراین آزمایش اندازه‌گیری می‌شود ازیك‌ثانیه‌کوچکتراست برای اندازه‌گیری زمان ازیك کرونومتر الکتریکی استفاده می‌شود که برحسب صدم ثانیه مدرج‌است. برای این‌کـه هنگام براه انداختن و متوقف‌کـردن کرونومتر خطائی‌توسط‌آزمایش‌کننده دراندازه‌گیری واردنشود ازکلید الکتریکی استفاده می‌شود، وقتی که‌کلید الکتریکی روی وضعیت A است جریانی توسط باتری C در آهنربای الکتریکی E برقرار می‌شود واین آهن‌ربا گلولهٔ فولادی را آماده برای افتادن نگه می‌دارد . همین که‌کلید K روی وضع B زده می‌شود مدار آهن‌ربای الکتریکی قطع‌می‌گردد وگلوله می‌افتد ولـی درهمین‌لحظه مدار کرونومتر الکتریکی بسته می‌شود وکرونومتر به‌راه‌می‌افتد و لحظه‌ای که‌گلوله به‌کلید L برخورد مـی‌کند مدار الکتریکی‌کرونومتردرمحل‌اتصال D قطع‌وکرونومتر متوقف مـی‌شود . به‌این ترتیب زمانـی‌که گلوله



شکل ۲-۱۴- آزمایش سقوط آزاد اجسام

ارتفاع h را مـی‌پیماید با دقت صدم ثـانیه روی کرونومترمعین می‌گردد. می‌توان‌آهن‌ربای‌آلکتریکی را ازجای اولیه بالا وبالاتر برد و آزمایش را تکرار کـرد و مسافتها و زمانهای اندازه‌گرفته شده را در جدولی ثبت نمود . فرض کنید آزمایش ۵ بار انجام شده ونتایج حاصل درجدول ۲-۳ ثبت‌گردیده‌است. مشاهده می‌شودکه نسبت $\frac{h}{t^2}$ مقدار ثابتی است که اندازهٔ متوسط آن تا دو رقم معنی‌دار $۴/۹ \frac{m}{s^2}$ است ونشان می‌دهدکه h متناسب با t^2 است یعنی:

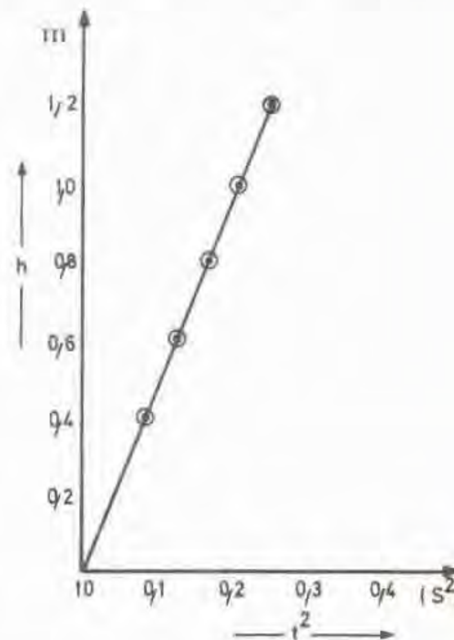
$$h \propto t^2$$

و یا
$$h_{(m)} = ۴/۹\, t^2_{(s^2)}$$

بنابراین نمودار تغییرات h با t^2 خط راستی است که شیب‌آن ۴/۹ است (شکل ۲-۱۵)

جدول ۲-۳

شماره آزمایش	ارتفاع سقوط (h) به m	زمان سقوط (t) به s	$\frac{h}{t^2}(\frac{m}{s^2})$	$\frac{2h}{t^2}(\frac{m}{s^2})$
—	۰	۰	۰	۰
۱	۰/۴۰	۰/۲۸۵	۴/۹	۹/۸
۲	۰/۶۰	۰/۳۵	۴/۹	۹/۸
۳	۰/۸۰	۰/۴۳	۴/۹	۹/۸
۴	۱/۰۰	۰/۴۵	۴/۹	۹/۸
۵	۱/۲۰	۰/۴۹۵	۴/۹	۹/۸



شکل ۲-۱۵- نمودار تغییرات h با t^2 درسقوط آزاد

پرسش ۲-۱۸- نمودار تغییرات h با t چگونه است؟

نتیجه این آزمایش نشان می‌دهد که اگر مقاومت هوا ناچیز باشد حرکت سقوط آزاد یك جسم در مجاورت زمین حرکتی است با شتاب ثابت که به صورت $h=\frac{1}{2}at^2$ است ، شتاب افتادن جسم را که ناشی ازجاذبهٔ زمین است چنان‌که می‌دانید به «g» نمایش می‌دهند ، بنابراین معادلهٔ حرکت سقوط‌آزاد جسم بدون سرعت اولیه چنین است :

$$h=\frac{1}{2}gt^2 \qquad (۱۴-۲)$$

و شتاب g از رابطهٔ بالا چنین حساب می‌شود :

$$g=\frac{2h}{t^2} \qquad (۱۵-۲)$$

اگـر به جای h و t مقادیـری را که طبق جدول ۲-۳ ازآزمایش به‌دست آمده است بگذاریم اندازهٔ متوسط g تا دو رقـم معنی‌دار برابر خواهد شد با $g=9/8\frac{m}{s^2}$

هر گاه درآزمایشهائی نظیر این‌آزمایش اجسامی به جـرمهای متفاوت به‌طور آزاد سقوط کنند نتایج حاصل درحدود دقت آزمایش یکسان خواهد بود ، بنابراین g معـرف شتاب سقوط آزاد کلیه اجسام است .

چنانچه بخواهیم سرعت حرکت جسمی راکه بدون سرعت اولیه سقوط آزاد می‌کند پس‌ازگذشت زمان t یا پس‌از پیمودن مسافت h معین کنیم کافی است‌که در روابط (۲-۱۰) و (۲-۱۲) v_0 راصفر بگیریم وبه‌جای شتاب a حرف g را قرار دهیم و v را حساب‌کنیم دراین صورت خواهیم داشت :

$$V=g.t \qquad (۱۶-۲)$$

و یا

$$V=\sqrt{2gh} \qquad (۱۷-۲)$$

پرسش ۲-۱۹ - چگونه می‌توانید رابطه $v=gt$ رامستقیماً ازرابطهٔ $h=\frac{1}{2}gt^2$ به‌دست‌آورید؟ چگونه می‌توانید فرمول $v=\sqrt{2gh}$ را ازترکیب دو رابطه $v=gt$ و $h=\frac{1}{2}gt^2$ به دست آورید؟

شتاب جاذبه درنقاط مختلف زمین- شتاب جاذبه زمین را یا به‌عبارت دیگر شتاب سقوط آزاد اجسام را درنقاط مختلف سطح کره زمین با دقت اندازه گرفته‌اند ومعلوم شده است که این‌شتاب مقدارثابتی نیست وازنقطه‌ای به‌نقطهٔ دیگر جزئی تغییرمی‌کند. با آن که تغییرات g جزئی است و اثر محسوسی بر اغلب مسائل عملی ندارد ولی بهتر این است که از وجود آنها آگاه باشیم. به‌طور کلی اندازه g درسطح زمین بین‌کمترین مقدار $9/7804\ \frac{m}{s^2}$ (در استوا یعنی‌درعرض جغرافیائی صفروسطح تراز دریا) وبیشترین مقدار $9/8321\ \frac{m}{s^2}$ (در دو قطب شمال وجنوب یعنی در عرض جغرافیائی $\pm 90°$) تغییر می‌کند.

تغییرات g بستگی به‌چند عامل مهم‌ازجمله، فاصلهٔ نقاط از مرکز زمین، دوران زمین، نامنظم بودن ساختمان طبقات زمین دارد. اندازه‌گیریهای دقیق و دائمی نشان می‌دهد که حتی جزر و مدآب اقیانوسها و دریاها نیز در تغییر g مؤثر است ولی این تغییرات خیلی کم ودرحدود میلیونیم است.

نظر به‌ثابت نبودن مقدار g درنقاط مختلف زمین، ادارهٔ اوزان‌ومقیاسات بین‌المللی برای‌کارهای عملی، اندازه استاندارد g را $9/80665\ \frac{m}{s^2}$ قبول کرده است، ولی در عمل معمولاً g را $9/80\ \frac{m}{s^2}$ منظور می‌دارند.

پرتاب در راستای قائم - وقتی که جسمی با تندی اولیه v_0 در راستای‌قائم به طرف بالا پرتاب می‌شود تندی آن به‌تدریج کم می‌گردد تا این‌که دریك نقطه به‌صفر برسد. جسم دریك لحظه دراین نقطه متوقف می‌شود سپس به طرف زمین سقوط می‌کند و در صورتی که اثر اصطکاك هوا برآن ناچیزباشد باهمان تندی‌که به‌بالا پرتاب شده بود به‌جای پرتاب اولیهٔ خود برمی‌گردد.

آزمایش و محاسبه نشان می‌دهدکه زمان لازم برای رسیدن جسم به‌بالاترین نقطه مسیر برابر زمانی است که جسم از این نقطه دوباره بمبدأ پرتاب خود برمی‌گردد.

پرسش ۲-۲۰- آیا در هرنقطهٔ دیگر از مسیر حرکت، اندازه‌تندی جسم دروقت بالارفتن، برابر اندازه تندی‌آن به‌هنگام پائین آمدن است؟

برای محاسبهٔ سرعت وزمان حرکت ومسافت پیموده شده می‌توان رابطه‌های (۲-۱۰) و (۲-۱۱) و (۲-۱۲) و (۲-۱۳) را به‌کار برد، کافی است که دراین رابطه‌ها به‌جای شتاب a شتاب جاذبه g وبه‌جای مسافت x ارتفاع h گذارده شود. بنابراین:

$v=v_0+gt$	(۱۸-۲)
$h=\frac{v+v_0}{2}t$	(۱۹-۲)
$h=v_0t+\frac{1}{2}gt^2$	(۲۰-۲)
$v^2-v_0^2=2gh$	(۲۱-۲)

یادآوری - وقتی که می‌خواهید روابط بالا را درحل مسائل بکار برید، به هنگام عددگذاری

نکات زیر را رعایت کنید .

۱) نقطه پرتاب را مبدأ سنجش فاصله‌ها بگیرید .

۲) فاصله‌های بالای مبدأ را مثبت وفاصله‌های پائین مبدأ را منفی بگیرید .

۳) تندیهای روبه‌بالا را با علامت مثبت و تندیهای روبه‌پائین را باعلامت منفی انتخاب کنید.

۴) علامت شتاب g راکه همواره روبه‌پائین است همیشه منفی بگیرید .

۵- درصورتی که جهت محورها رو به پائین مثبت‌انتخاب شود مقدارکمیتهای فوق تغییرعلامت می‌دهند .

اینك چند مثال :

مثال ۱- سنگی در راستای قائم با تندی $۳۹/۲\frac{m}{s}$ روبه‌بالا پرتاب می‌شود . چه‌زمانی طول می‌کشد تا به بالاترین نقطه مسیر خود (نقطه‌اوج) برسد ؟ (مقاومت هوا را ناچیز فرض کنید) .

ـ اگربراساس نکات فوق جهت روبه‌بالا را مثبت بگیریم اندازه کمیتهای مورد لزوم با رعایت علامت عبارتست از :

$$g=-۹/۸۰\frac{m}{s^۲} \quad \text{و} \quad v_۰=۳۹/۲\frac{m}{s}$$

درلحظه‌ای که سنگ به‌نقطهٔ اوج خودمی‌رسد $v=۰$ است و خواهیم داشت :

$$v=v_۰+gt$$

$$t=\frac{v-v_۰}{g} \quad \text{و}$$

اگرمقادیر عددی را با رعایت علامت آنها دراین معادله بگذاریم خواهیم داشت :

$$t=\frac{۰-۳۹/۲\frac{m}{s}}{-۹/۸۰\frac{m}{s^۲}}=۴/۰s$$

مثال ۲- ازبالای یك بلندی‌که تا سطح زمین $۷۸/۴m$ فاصله دارد توسط یك‌کمان تیری باتندی $۲۹/۴\frac{m}{s}$ در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می‌شود . اگراثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد .

الف ــ تاچه ارتفاعی‌نسبت به مبدأ پرتاب ، تیر بالا می‌رود ؟

ب ــ چه زمانی طول می‌کشد تا به‌نقطه‌اوج خود برسد ؟

پ ــ پس‌ازگذشت چه زمانی به مبدأ پرتاب برمی‌گردد ؟

ت ــ با چه سرعتی به سطح زمین می‌رسد ؟

ج ــ مدت‌کل حرکت آن چند ثانیه است ؟

الف : داریم

$$g=-۹/۸۰\frac{m}{s^۲} \quad \text{و} \quad v_۰=۲۹/۴\frac{m}{s}$$

در نقطهٔ اوج $v=۰$ است و h ازرابطهٔ زیرحساب می‌شود :

$$v^۲=v_۰^۲+۲gh$$

و یا

$$h=\frac{v^۲-v_۰^۲}{۲g}=\frac{(۰)-(۲۹/۴\frac{m}{s})^۲}{۲\times(-۹/۸\frac{m}{s^۲})}$$

و ازآنجا :

$$h=\frac{-۸۶۴/۴\frac{m^۲}{s^۲}}{-۱۹/۶۰\frac{m}{s^۲}}=۴۴/۱\ m$$

ب ــ زمان لازم برای رسیدن بـه نقطه اوج ازرابطهٔ زیر حساب می‌شود :

$$v=v_۰+gt$$

$$t=\frac{v-v_۰}{g} \quad \text{یا}$$

به ازاء $v = 0$ و $v_0 = 29.4\frac{m}{s}$

و $g = -9.80\frac{m}{s^2}$ داریم

$$t = \frac{0 - 29.4\frac{m}{s}}{-9.80\frac{m}{s^2}} = 3.0s$$

پ ـ زمان رفتن و برگشتن جسم را به‌مبدأ پرتاب از رابطهٔ زیر حساب می‌کنیم

$$h = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

چون درمبدأ پرتاب $h = 0$ است کافی است دراین رابطه h را صفربگیریم یعنی :

$$0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 = t\left(v_0 + \frac{1}{2} g t\right)$$

دراین‌جادوجواب به‌دست می‌آید: یکی $t = 0$ که لحظهٔ پرتاب‌است ودیگری

$$t = -\frac{2v_0}{g}$$

که جواب مسأله ، یعنی زمان رفت وبرگشت است ومقدارآن برابر است با :

$$t = -\frac{2 \times 29.4\frac{m}{s}}{-9.80\frac{m}{s^2}} = 6.0s$$

ت ـ سرعت جسم به‌هنگام رسیدن بـه زمین از رابطهٔ زیر حساب می‌شود :

$$v^2 = v_0^2 + 2gh$$

به‌ازاء $v_0 = 29.4\frac{m}{s}$ و $g = -9.8\frac{m}{s^2}$ و $h = -78.4m$ داریم :

$$v^2 = \left(29.4\frac{m}{s}\right)^2 + 2 \times \left(-9.80\frac{m}{s^2}\right) \times \left(-78.4\,m\right) = 864.4\frac{m^2}{s^2} + 1536.6\frac{m^2}{s^2} = 2401\frac{m^2}{s^2}$$

باجذر گرفتن ازاین عدد دوجواب به‌دست‌آید:

یکی $v = +49.0\frac{m}{s}$ ودیگری $v = -49.0\frac{m}{s}$

ازاین دو جواب آن‌کـه علامت منفی دارد جواب سؤال است . جواب بـا علامت مثبت برابر تندی پرتاب جسم از سطح زمین روبه‌بالاست .

ج ـ برای حساب‌کردن مدت‌کل‌حرکت‌کافی است‌که در رابطهٔ

$$v = v_0 + gt$$

این مقادیررا قرار دهیم :

$$v_0 = 29.4\frac{m}{s} \text{ و } v = -49.0\frac{m}{s}$$

$$\text{و } g = -9.80\frac{m}{s^2}$$

دراین‌صورت داریم :

$$t = \frac{v - v_0}{g} = \frac{-49.0\frac{m}{s} - 29.4\frac{m}{s}}{-9.80\frac{m}{s^2}} = \frac{-78.4\frac{m}{s}}{-9.80\frac{m}{s^2}} = 8.0\,s$$

مثال ۳ ـ سنگی را در شرایط خلاء بـاتندی $19.6\frac{m}{s}$ در راستای قائم به طرف بـالا پرتاب می‌کنیم . معین‌کنید پس‌ازچه‌زمانی (بعد از پرتاب سنگ اول) باید سنگ دیگری را بـاهمان تندی در همین راستا روبه‌بالا پرتاب کنیم تـا درنیمه ارتفاع اوج ، سنگ اول را تلاقی کند .

ـ بدیهی است سنگ دوم ، سنگ اول را موقعی‌که درحال‌برگشت است تلاقی می‌کند. اگر h نمایش ارتفاع اوج باشد زمانی‌که لازم است تاسنگ به‌نیمه ارتفاع‌اوج برسد ازرابطهٔ زیرحساب می‌شود:

$$\frac{h}{2} = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \qquad (1)$$

از طرف دیگر داریم :

$$v^2 - v_0^2 = 2gh$$

درنقطه اوج $v = 0$ است بنابراین :

$$0 - v_0^2 = 2gh$$

و

$$(2) \qquad h = -\frac{v_0^2}{2g} \text{ ارتفاع اوج}$$

ازترکیب دومعادله (۱) و (۲) نتیجه‌می‌شود:

$$-\frac{v_0^2}{4g} = v_0 t + \frac{1}{2}gt^2$$

و یا

$$gt^2 + 2v_0 t + \frac{v_0^2}{2g} = 0$$

وجوابهای این معادله :

$$t = \frac{-v_0 \pm \sqrt{v_0^2 - \frac{v_0^2}{2}}}{g} = \frac{-v_0 \pm v_0 \frac{\sqrt{2}}{2}}{g}$$

$$= \frac{-v_0}{g}\left(1 \pm \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$$

است .

به طوری که ملاحظه می‌شود برای زمان t دوجواب است : یکی زمانی کـه لازمست تا سنگ به هنگام بالا رفتن ، مستقیماً بـه نیمه ارتفاع اوج خود برسد یعنی :

$$t_1 = \frac{-v_0}{g}\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) = \frac{-19/6\frac{m}{s}}{-9/80\frac{m}{s^2}}$$

$$\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \simeq 2(1 - 0/707) \simeq 0/58s$$

و دیگری زمانی که لازم است تا سنگ به نقطه اوج خود برود وبه‌نیمه ارتفاع اوج برگردد . این زمان بزرگتر است :

$$t_2 = \frac{-v_0}{g}\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) = \frac{-19/6\frac{m}{s}}{-9/80\frac{m}{s^2}}$$

$$\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \simeq 2(1 + 0/707) \simeq 3/41\,s$$

زمان مطلوب مسأله تفاضل این دوزمان‌است یعنی :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 3/41 - 0/58 = 2/83s$$

خودتان آزمایش کنید

I ــ به‌کمك سطح شیب‌دار ، قانون سقوط آزاد اجسام را به‌دست آورید وسائل لازم :

تخته درازی‌که در سرتاسر وسط‌آن‌شیار نسبتاً گودی تعبیه شده وسطح این شیار به‌خوبی صیقلی است .

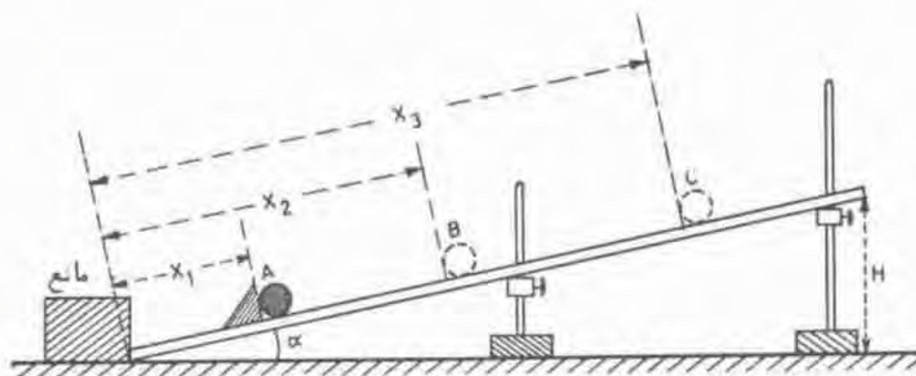
کرونومتر یا ساعت‌کرونومتردار .

گلوله فولادی کوچك .

الف ــ یك سرتخته را روی سطح افقی میز یازمین قرار دهید وبا مانع یاگیره‌ای ازلغزیدن آن جلوگیری کنید . این مانع جلو ادامهٔ حرکت گلوله را نیز می‌گیرد . سردیگرتخته را تا

ارتفاع مناسب «h» بالابیاورید و آن را روی گیره‌ای که به‌پایه‌ای بسته‌اید استوار کنید (شکل ۲-۱۶).

اگـر طول تخته d باشد نسبت $\frac{h}{d}$ را که برابر $sin\alpha$ است به‌جای شیب سطح انتخاب کنید. زیرا اندازه‌گیری این نسبت آسانتر از اندازه‌گیری $tg\alpha$ است (α زاویه سطح شیب‌دار با سطح افقی است) .



شکل ۲-۱۶- سطح شیب‌دار برای تحقیق قانون سقوط آزاد اجسام

گلوله فولادی را از نقاط مختلف سطح شیب‌دار ، مانند A و B و C و ... رها کنید و زمان رسیدن آن را به پائین سطح اندازه‌بگیرید و نتایج را درجدولی مانند جدول ۲-۴ ببرید (آزمایش را برای هریك ازمسافتها دست‌کم سه‌بار تکرار کنید ومیانگین زمانهای اندازه گرفته شده را حساب کنید).

جدول ۲-۴

شتاب حرکت(به $\frac{m}{s^2}$)	$\frac{x}{t^2}$(به $\frac{m}{s^2}$)	t (زمان حرکت به ثانیه)	x (مسافت پیموده شده به‌متر)	شماره‌آزمایش

توجه داشته باشید که مسیر حرکت گلوله کاملا خط راست باشد . یعنی اگر تخته بلند و سنگین است وسط آن شکم ندهد . برای کنترل این‌موضوع پایه وگیره دیگری در صورت لزوم وسط تخته بگذارید وشیب تخته را دروسط نیز بیازمائید . t^2 را روی محور افقی و x را روی محور عمود برآن ببرید ونمودار تغییرات $\frac{x}{t^2}$ را رسم‌کنید وقانون حرکت را نتیجه بگیرید .

ب ـ با تغییردادن ارتفاع h شیب سطح را ۲ و ۳ و ... برابر کنید وزمان حرکت گلوله را برای یك مسافت معین x در شیبهای مختلف اندازه بگیرید و درجدولی مانند جدول ۲ـ۵

جدول ۲ـ۵

نسبت $\frac{h}{d}$	t=زمان حرکت برای مسافت معین x	شتاب = $\frac{2x}{t^2}$	$\frac{\text{شتاب}}{\text{شیب سطح}}$

ببرید ، سپس روی کاغذ میلیمتری نموداری رسم کنید که محور افقی آن نمایش شیب سطح ($\frac{h}{d}$) و محور عمودی آن نمایش شتاب حرکت باشد . با ادامه دادن نمودار ، وقتیکه نسبت $\frac{h}{d}$ به ۱ می‌رسد (یعنی زاویه سطح شیب دار با سطح افقی °۹۰ می‌شود) وجسم سقوط آزاد می‌کند شتاب آن را به‌دست آورید .

II ـ درصورتی که دستگاهی مانند دستگاه شکل ۲ـ۱۴ برای مطالعهٔ سقوط آزاد اجسام درآزمایشگاه دبیرستان موجود است قانون سقوط آزاد اجسام را مستقیماً بررسی کنید .

به این پرسشها پاسخ دهید

۱) ـ حرکت یکنواخت برروی یك خط راست را دریك جمله کوتاه تعریف کنید . چه نمونه‌هائی ازاین نوع حرکت را می‌شناسید ؟

۲) ـ سرعت لحظه‌ای را تعریف کنید ورابطهٔ ریاضی آن را بنویسید . چه فرقی بین سرعت لحظه‌ای وسرعت متوسط است ؟

۳) ـ درچه نوع حرکتی سرعت لحظه‌ای و سرعت متوسط با هم برابرند ؟

۴) ـ حرکت یك اتومبیل دریك جاده چه نوع حرکتی است ؟ دربارهٔ آن بحث کنید .

۵) ـ چگونه می‌توانید به کمك یك نمودار مسافت ـ زمان که در اختیار دارید سرعت متوسط متحرك بین دولحظهٔ t_1 و t_2 را معین کنید ؟ چگونه سرعت لحظه‌ای متحرك را درلحظهٔ t_1 یا t_2 معین می کنید ؟ اگراین نمودار خط راست باشد آیا تفاوتی بین این دوسرعت مشاهده می‌شود ؟

۶) ــ درنظر بگیرید که سرعت‌سنج یك‌اتومبیل برای‌وقتی که اتومبیل خالی وقطرچرخهای برنده (معمولا چرخهای عقب) ۰٫۶۰ متر است درجه بندی شده است .

الف ــ اگر چرخهای این اتومبیل باچرخهائی که قطرآنها ۰٫۷۰ متر است عوض شوند سرعت واقعی اتومبیل وقتی کــه عقربه سرعت‌سنج $۵۰ \frac{Km}{h}$ را نشان می‌دهد چه اندازه است ؟

ب ــ اگرفشار بادلاستیکهای اتومبیل کم باشد واتومبیل با ظرفیت کامل مسافر حرکت کندسرعتی که روی‌سرعت‌سنج دراین حالت خوانده می‌شود آیا از سرعت حقیقی اتومبیل کمتر است یا بیشتر؟ توضیح دهید .

۷) ــ فرض کنیدبرای تعیین نوع حرکت یك متحرك ، درچند لحظهٔ متوالی مسافت پیموده شده را اندازه گرفته ونمودار مسافت ــ زمان این متحرك را رسم کرده‌اید .

الف ــ اندازه‌های واقعی در روی این نمودار مربوط به چه نقاطی هستند .

ب ــ آیا به‌کمك این‌نمودار می‌توانید سرعت لحظه‌ای واقعی متحرك‌را درهرلحظه‌واقع درمحدودهٔ اندازه‌گیری تعیین کنید ؟ توضیح دهید .

پ ــ آیا می‌توانید با امتداد دادن نمودار به‌روالی که در محدودهٔ اندازه‌گیری رسم شده است سرعت لحظه‌ای متحرك را دربیرون ازمحدودهٔ اندازه‌گیری برآورد کنید ؟

ت ــ برآورد اندازه‌ها را درمحدودهٔ نمودار « انترپولاسیون[۱] » و دربیرون از محــدوده نمودار « اکستراپولاسیون[۲] » می‌نامند . به‌نظرشما کدام یك ازاین دوبرآورد دقیق‌تر است ؟

۸) ــ درآزمون حرکت یك اتومبیل که‌ازحال‌سکون به‌حرکت درآمده است اعداد مندرج در جدول ۲ــ۶ معرف سرعتهای لحظه‌ای اتومبیل در ثانیه‌های متوالی بوده است .

جدول ۲-۶

زمان (s)	سرعت $(\frac{m}{s})$	زمان (s)	سرعت $(\frac{m}{s})$
۰/۰	۰/۰		
۱/۰	۶/۳	۶/۰	۲۷/۳
۲/۰	۱۱/۶	۷/۰	۲۹/۵
۳/۰	۱۶/۵	۸/۰	۳۱/۳
۴/۰	۲۰/۵	۹/۰	۳۳/۱
۵/۰	۲۴/۱	۱۰/۰	۳۴/۹

۱- Interpolation
۲- Extrapolation

نمودار سرعت ـ زمان حرکت این اتومبیل را رسم کنید سپس شتابهای لحظه‌ای اتومبیل را تعیین کرده و نمودار شتاب ـ زمان این حرکت را نیز رسم کنید و معین نمائید :

الف ـ سرعت اتومبیل درلحظهٔ $t=2/5s$ چه اندازه است ؟

ب ـ شتاب ماکزیمم چه اندازه است ؟

۹) ـ آیا دو جملهٔ زیر در بارهٔ حرکت یك جسم درست است؟ در بارهٔ جواب خود توضیح دهید

۱ـ اگر اندازه تندی ثابت باشد شتاب الزاماً صفر خواهد بود .

۲ـ اگر شتاب ثابت باشد حرکت الزاماً برروی خط راست خواهد بود .

۱۰)ـ دریك تلویزیون معمولی دسته پرتو الکترون درمـدت ۰/۰۳۰ ثانیه تصویر کاملی را که برتمام صفحه تلویزیون تشکیل می‌شود ازبالا تاپائین بطور افقی خط بخط جاروب می‌کند . اگر هرتصویر از ۵۲۵ خط تشکیل شود و عرض صفحه تلویزیون تقریباً ۰/۵۰ متر (۲۰ اینچ) باشد سرعت حرکت این دسته پرتو برروی صفحه تلویزیون چه‌اندازه است ؟

۱۱) ـ شکل ۲-۱۷ چند وضعیت متوالی از یك‌توپ بیسبال را نشان می‌دهدکـه ازسمت چپ به راست درحرکت بـوده است . وضعیتهای متوالی توپ به وسیلهٔ عکاسی استروبوسکپی مشخص شده است ومدت بین دوآذرخش (فلاش) متوالی ۰/۲۰ ثانیه می‌باشد وطول‌سنجی که درشکل دیده می‌شود برحسب سانتیمتر مدرج است .



شکل ۲-۱۷

جدولی تنظیم کنیدکه دریك ستون‌آن فاصله‌های پیموده شده توسط این توپ و درستون دیگر زمان حرکت نوشته شده باشد و نمودار مسافت ـ زمان این‌حرکت را رسم کنید . سرعت لحظه‌ای درلحظه‌هائی‌که وضعیت توپ درشکل مشخص شده است چیست ؟

نمودار سرعت ـ زمان این حرکت را رسم نمائید وشتاب حرکت را حساب‌کنید .

۱۲) ـ بایك شکل نشان دهیدکه اندازه مسافت طی شده توسط یك متحرك برابر اندازه سطح محصور بین نمودار سرعت ـ زمان ومحور نمایش زمان است .

۱۳) ـ اگر مستقیماً دو رابطه $x=v.t$ و $v=a.t$ را با هم ترکیب کنید رابطهٔ $x=at^2$ را بدست خواهیدآورد . دراینجا چه چیز نادرست است ؟

۱۴) ـ هر کمیتی که به‌طور یکنواخت تغییر کند مقدار متوسط‌آن برابر با نصف مجموع دومقدار اولی و آخری آن کمیت است . این‌موضوع را دربارهٔ هر کمیتی که مایلید بیازمائید: مثلا سن متوسط ۵ نفر که سن‌آنان به‌ترتیب ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ سال است چیست ؟

۱۵) ـ مفهوم شتاب ثابت این است که در زمانهای متوالی و متساوی Δt ، اندازه‌های Δv یکی هستند. ازمطالب زیر کدامشان به نحوی این مفهوم را درست بیان می‌کنند؟

الف ـ Δv متناسب با Δt است .

ب ـ مقدار ثابت $= \frac{\Delta v}{\Delta t}$ است .

پ ـ نمودار سرعت ـ زمان یك خط راست است .

ت ـ v متناسب با t است .

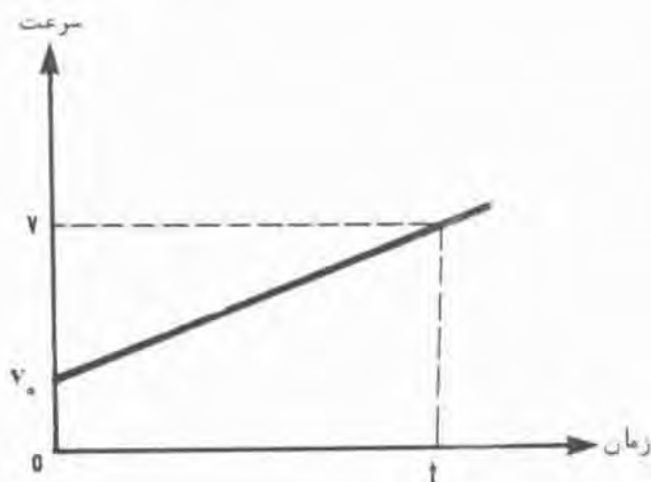
۱۶) ـ رابطهٔ $v^2 - v_0^2 = 2ax$ را از ترکیب دو رابطهٔ $x = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t$ و $v = at + v_0$ مستقیماً بدست آورید .

۱۷) ـ با محاسبه نشان دهید که

الف ـ اگر گلوله‌ای درشرایط خلأ در راستای قائم باسرعت اولیه v_0 به‌طرف بالاپرتاب شود تا ارتفاع $h = \frac{v_0^2}{2g}$ بالامی‌رود.

ب ـ درلحظه‌ای که به مبدأ پرتاب برمی‌گردد سرعت آن نیز برابر v_0 است .

۱۸) ـ نمودار سرعت ـ زمان شکل (۲ـ۱۸) را بکار برید و با توجه به‌این‌نکته‌که سطح زیر این نمودار برابرمسافت پیموده شده است معادلهٔ $x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ را به دست آورید .



شکل ۲ـ۱۸ ـ نمودار سرعت‌ـزمان

۱۹) ـ اگر شتاب حرکت یك متحرك که برروی خط راست حرکت مـی‌کند ثابت نباشد آیا تندی متوسط متحرك بین دولحظهٔ t_1 و t_2 برابر $\frac{v_1+v_2}{2}$ است ؟ پاسخ خود را به کمك نمودار اثبات کنید .

۲۰) ـ اگرشتاب حرکت جسمی ثابت باشدآیا ممکن است جهت یا راستای تندی‌آن‌جسم تغییرکند ؟ مثال بزنید .

این مسأله‌ها را حل کنید

۱) ـ درمسابقه‌های ورزشی جهانی(المپیك) ۱۹۶۸ میلادی در مسابقات دو مردان ، رکوردهائی به شرح زیر بهدست آمده است :

۱- ۱۰۰ متر در ۹/۹ ثانیه

۲- ۲۰۰ متر در ۱۹/۸ ثانیه

۳- ۴۰۰ متر در ۴۳/۸ ثانیه

۴- ۸۰۰ متر در ۱ دقیقه و ۴۴/۳ ثانیه

۵- ۱۵۰۰ متر در ۳ دقیقه و ۳۴/۹ ثانیه

۶- ۵۰۰۰ متر در ۱۴ دقیقه و ۵ ثانیه

۷- ۱۰،۰۰۰ متر در ۲۹ دقیقه و ۲۷/۴ ثانیه

الف ـ سرعت متوسط هردونده را حساب‌کنید .

ب ـ مسافت را روی محور افقـی وسرعت را روی محور عمود برآن ببرید و نمودار مسافت ـ سرعت را برای این نتایج تامسافت ۵۰۰۰ متر بهدست‌آورید .

۲) ـ یك‌فضانورد باسفینهٔ فضائی خود در ارتفاع ۶۵۰ کیلومتری بـالای سطح زمین در مدت ۱ ساعت و ۳۲ دقیقه و ۱۰ ثانیه یك دور به‌گرد زمین می‌گردد . اگرشعاع متوسط زمین ۶۳۷۰ کیلومترباشد سرعت متوسط حرکت سفینه را حساب‌کنید .

جواب : تقریباً $8\frac{km}{s}$

۳) ـ سرعت پخش امواج رادیوئی درخلاْ خیلی نزدیك به $3\times10^{8}\frac{m}{s}$ است . فاصله نزدیکترین ستاره[1] از زمین 4.06×10^{16} متر است . اگـر فرض کنیم کـه این ستاره دارای

---

۱) نام این ستاره Alpha Centauri است .

سیاراتی باشد که برروی آنها موجودات پیشرفته‌ای زندگی کنند وآنان امواج رادیوئی به طرف زمین بفرستند چه مدت طول می‌کشد تا این امواج به‌زمین برسند .

جواب: $۱/۳۵ \times ۱۰^۸$ ثانیه یا تقریباً ۴/۳ سال

۴) ـ یك هواپیمای چهار موتوره ملخ‌دار که سرعت پروازآن $۶۰۰\frac{km}{h}$ است ازفرودگاه تهران به‌مقصد لندن پرواز می‌کند . یکساعت و چهل دقیقه بعد ، یك هواپیمای جت که‌سرعت پروازآن $۹۲۰ \frac{km}{h}$ است از همین فرودگاه به مقصد لندن پرواز می‌نماید .

الف ـ چه مدت طول می‌کشد تا دوهواپیما بههم برسند .

ب ـ چه‌مسافتی دوهواپیما دراین مدت پیموده‌اند .

جواب : الف : ۳ ساعت و ۷/۵ دقیقه

ب : ۲۸۷۵km

۵) ـ دو هواپیما با هم از دو باند پرواز یك فرودگاه به‌مقصد یك شهر پرواز می‌کنند . سرعت پروازیکی ازاین‌دو هواپیما $۴۵۰\frac{km}{h}$ وسرعت پرواز دیگری $۶۷۰ \frac{km}{h}$ است هواپیمای تندرو ۴۰ دقیقه زودتر ازهواپیمای دیگر به‌مقصد می‌رسد . مطلوبست :

الف ـ فاصله دوشهر

ب ـ مدت پرواز هریك از دوهواپیما

جواب : الف ـ ۹۱۴ km

ب ـ ۲ ساعت و ۱/۸۲ دقیقه و

۱ ساعت و ۲۱/۸۲ دقیقه

۶) ـ سرعت متوسط شما درهریك ازدوحالت زیرچیست ؟

الف ـ اگر ۱۰۰ مترمسافت را باسرعت $۵/۰\frac{m}{s}$ بدوید و ۱۰۰ متر مسافت دیگـر را با سرعت $۱/۰\frac{m}{s}$ راه بروید .

ب ـ اگر درمدت ۱۰۰ ثانیه با سرعت $۵/۰\frac{m}{s}$ بدوید و در مدت ۱۰۰ ثانیه دیگر بـا سرعت $۱ \frac{m}{s}$ راه بروید.

جواب : الف ـ $\sim ۱/۷\frac{m}{s}$

ب ـ $۳/۰\frac{m}{s}$

۷) ـ یك اتومبیل نصف مسیری را باسرعت $۱۰۰\frac{km}{h}$ و نصف دیگررا باسرعت $۶۰\frac{km}{h}$

می‌پیماید . سرعت متوسط آن درتمام مسیر چند $\frac{km}{h}$ است ؟

جواب : $۷۵\frac{km}{h}$

۸) ـ یک‌هواپیمای جت روی باند پرواز ازحال سکون شروع به‌حرکت می‌کند و پس از ۴۵/۰ ثانیه باسرعت $\frac{m}{s}$ ۸۰/۰ اززمین بلند می‌شود. اگرشتاب این‌حرکت‌ثابت باشدمطلوبست

الف ـ اندازه این شتاب

ب ـ مسافتی‌که هواپیما پیش ازپرواز ، روی زمین می‌پیماید .

پ ـ نسبت مسافتهائی‌که این هواپیما درثانیه چهل وپنجم وثانیه یکم می‌پیماید .

جواب :

الف ـ $\frac{m}{s^۲}$ ۱/۷۸ ≈

ب ـ ۱۸۰۰m

پ ـ ۸۹

۹) ـ موتورسواری ازحال سکون بهراه می‌افتد وپس ازپیمودن مسافت ۱۲۰m سرعتش بــه $\frac{m}{s}$ ۳۰/۰ می‌رسد. مطلوبست شتاب متوسط حرکت‌موتورسوارومدتی‌که‌این مسافت‌رامی‌پیماید.

۱۰) ـ یك اتومبیل سواری ازحال‌سکون به حرکت درمــی‌آید ودرمدت ۱۲/۰ ثانیه بـا شتاب $\frac{m}{s^۲}$ ۱/۸۰ حرکت می‌کند تا سرعت‌آن به v برسد . سپس مدت ۸/۰ ثانیه با این‌سرعت ثابت v به‌حرکت خود ادامه می‌دهد وبعد ترمز می‌شود وپس از ۱۰/۰ ثانیه متوقف می‌گردد. مطلوبست :

الف ـ سرعت v

ب ـ شتاب حرکت اتومبیل موقعی‌کــه ترمــز شده است (فرض کنید این شتاب ثابت بوده است)

پ ـ کل مسافتی‌که اتومبیل پیموده است .

۱۱) ـ از روی‌کامیونی که با سرعت $\frac{km}{h}$ ۹۰/۰ در حرکت است جعبهٔ سنگینی روی جاده می‌افتد و ۴۵ متر درامتداد جاده برروی زمین می‌لغزد تا متوقف شود مطلوبست :

الف ـ سرعت اولیه جعبه به $\frac{m}{s}$.

ب ـ شتاب حرکت جعبه به‌فرض این‌که ثابت باشد .

پ ـ زمانی‌که طول می‌کشد تا متوقف شود .

۱۲) ـ راننده‌ای‌که اتومبیل خودرا باسرعت $\frac{km}{h}$ ۷۲ درجاده‌ای می‌راند ناگهان متوجه

مانعی درجلوخود می‌شود وترمز می‌کند . اگرزمان عکس‌العمل راننده ۰/۵ ثانیه باشد (زمان عکس‌العمل‌زمانی است‌که راننده پس ازمشاهده مانع پای خود را روی ترمزمی‌گذارد) وحرکت اتومبیل باشتاب $5\frac{m}{s^2}$ کند شود ، راننده از لحظهٔ دیدن مانـع پس از پیمودن چه مسافتی اتومبیل را متوقف می‌کند ؟

جواب : $50m$

۱۳) ــ ترنی باتندی ثابت v روی ریل مستقیم وافقی درحرکت است . ترن دیگری با تندی $v'>v$ روی همین ریل به دنبال ترن اول نیز درحرکت است . دریك لحظه راننده ترن دوم ترن جلوئی را به فاصله d مقابل خود مشاهده می‌کند وحرکت ترن خود را باشتاب a کند می‌نماید. حساب‌کنید برای این‌که ترن عقبی به ترن جلوئی برخورد نکند باید $a>\frac{(v'-v)^2}{2d}$ باشد درصورتی‌که $a<\frac{(v'-v)^2}{2d}$ باشد دوترن به‌هم برخورد می‌کنند.

۱۴) ــ دو ترن یکی باتندی $60\frac{km}{h}$ و دیگری با تندی $80\frac{km}{h}$ روی یك ریل مستقیم و افقی به طرف یکدیگر درحرکتند . وقتی فاصله آنها ازیکدیگر به ۲ کیلو متر می‌رسد هریك ازدوراننده ترن دیگر را مقابل خود می‌بینند و هـردو باهم ترمز می‌کنند . اگر در اثر ترمز حرکت هریك ازترنها باشتاب ثابت $1\frac{m}{s^2}$ کند شود معین کنید آیـا دو ترن به‌هـم برخورد می‌کنند یا نه ؟

۱۵) ــ اتومبیلی‌که درسریك چهارراه پشت چراغ قرمزمتوقف است پس‌ازسبزشدن چراغ با شتاب $0/4\frac{m}{s^2}$ به راه می‌افتد . درهمین لحظه کامیونی با سرعت $36\frac{km}{h}$ ازاین اتومبیل‌سبقت می‌گیرد و از چهار راه مـی‌گذرد . اگر کامیون با این سرعت ثابت بـه حرکت خود ادامه دهد معین‌کنید :

الف ــ پس ازگذشت چه‌زمانی اتومبیل دوباره به‌کامیون می‌رسد ؟

ب ــ سرعت اتومبیل درلحظهٔ رسیدن به‌کامیون چه‌اندازه است ؟

جواب :
الف ــ $5s$
ب ــ $20\frac{m}{s}$

۱۶) ــ لکوموتیوی ازحال سکون باشتاب ثابت $1/0\frac{m}{s^2}$ شروع به حـرکت مـی‌کند . ۱۰/۰ ثانیه بعداتومبیلی ازهمان مکان باشتاب ثابت $2/0\frac{m}{s^2}$ درجاده‌ای موازی با مسیرحرکت لکوموتیو ازحال سکون نیز به راه می‌افتد . معین‌کنید :

الف ــ زمانی راکه لازم است تا اتومبیل به‌لکوموتیو برسد .

ب ـ مسافتی را که هردو وسیله پیموده‌اند .

پ ـ سرعتهای اتومبیل ولکوموتیو را درلحظه‌ای‌که به‌هم می‌رسند .

الف ـ $\approx ۲۴/۱s$

جواب : ب ـ $\approx ۵۸۱m$

پ ـ $۴۸/۲\frac{m}{s}$ و $۳۴/۱\frac{m}{s}$

۱۷) ـ اتومبیلی که ساکن است به راه می‌افتد و در ۵/۰ ثانیه اول با شتاب ثابت $۳/۶۰\frac{m}{s^2}$ و در ۴/۰ ثانیه بعد باشتاب $۲/۵\frac{m}{s^2}$ و در ۵/۰ ثانیه دیگرباشتاب $۱/۶\frac{m}{s^2}$حرکت می‌کند مطلوبست :

الف ـ بیشترین سرعت اتومبیل دراین حرکت .

ب ـ مسافت کل پیموده شده .

پ ـ رسم نمودار سرعت ـ زمان این حرکت .

جواب : الف ـ $۳۶/۰\frac{m}{s}$

ب ـ $۲۹۷/۰m$

۱۸) ـ از دست یك کارگرساختمان‌که روی چوب بستی کارمی‌کند چکشی بدون سرعت اولیه رها می‌شود وپس از ۳/۶۰ ثانیه به‌سطح زمین می‌رسد . اثرمقاومت هوا برحرکت چکش ناچیز است :

الف ـ کارگر درچه ارتفاعی از سطح‌زمین است .

ب ـ چکش با چه سرعتی به‌سطح زمین برخورد می‌کند .

الف ـ $۶۳/۵m$

جواب : ب ـ $۳۵/۳\frac{m}{s}$

۱۹) ـ گلوله‌ای درشرایط خلأ در راستای قائم به‌طرف بالاپرتاب شده و پس‌از ۴ ثانیه به مبدأ پرتاب اولیه برگشته است . تاچه ارتفاعی این گلوله بالا رفته وبا چه سرعتی پرتاب شده است ؟

جواب : $۱۹/۶m$ و $۱۹/۶\frac{m}{s}$

۲۰) ـ سنگی در شرایط خلأ ازیك بلندی بدون سرعت اولیه رها می‌شود و با سرعت v پس‌از زمان $t=\frac{v}{g}$ به سطح زمین می‌رسد . زمانی‌که لازم است تا سنگ به نیمه مسیر خود

برسد برابر است با :

$\frac{v}{4g}$ -۱ $\frac{v}{2g}$ -۲ $\frac{v\sqrt{2}}{g}$ -۳ $\frac{v\sqrt{2}}{2g}$ -۴

با محاسبه جواب درست را به دست‌آورید .

۲۱) ـ ازیك نقطه که تاسطح زمین $10/0m$ فاصله دارد گلوله کوچك وسنگینی درراستای قائم به‌طرف بالا پرتاب می‌شود . این گلوله به‌هنگام برگشت ، فاصله بین نقطه پرتاب وزمین را درمدت ۰/۱ ثانیه می‌پیماید مطلوبست :

الف ـ سرعت پرتاب اولیه .

ب ـ سرعت گلوله در لحظهٔ برخورد به زمین .

جواب : الف ـ $5/1\frac{m}{s}$ ب ـ $14/9\frac{m}{s}$

۲۲) ـ ازبالونی که با تندی ثابت $5\frac{m}{s}$ در راستای قائم رو به‌بالا درحرکت است کیسه شنی رها می‌شود . فاصله بالون ازسطح زمین درلحظهٔ رها شدن کیسه شنی $20m$ است .

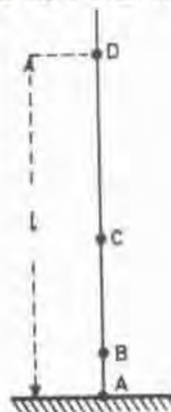
الف ـ سرعت و وضع کیسه شنی را در زمانهای $\frac{1}{2}$ و ۱ و ۲ ثانیه پس از رها شدن حساب کنید .

ب ـ کیسه چه مدت پس از رها شدن به سطح زمین می‌رسد .

درحل این مسأله برای سهولت محاسبه g را $10\frac{m}{s^2}$ بگیرید .

۲۳) ـ ثابت کنیدکه درحرکت برروی خط راست باشتاب ثابت a، مسافتهای پیموده شده در زمانهای متوالی و متساوی مانند t ، جمله‌های یك تصاعد حسابی هستند که قدر نسبت آن $d=at^2$ است .

۲۴) ـ چهارگلوله کوچك A و B و C و D به نخ سبکی بسته شده‌اند . فاصله گلوله‌ها از یکدیگر چنان تنظیم شده است که اگر نخ را در راستای قائم نگاهداریم به‌طوری‌که گلوله A با سطح زمین درتماس باشد (شکل ۲–۱۹) و آن را رها کنیم گلوله‌ها یکی پس از دیگری در زمانهای متوالی مساوی به سطح زمین برخورد می‌کنند . اگر فاصله AD برابر l (مثلا یك متر) باشد فاصله هردو گلوله متوالی را حساب کنید .



شکل ۲-۱۹

جواب : $AB=\frac{l}{9}$ و $BC=\frac{3l}{9}$ و $CD=\frac{5l}{9}$

۲۵) ـ تیرهائی با یك کمان در شرایط خلأ یکی

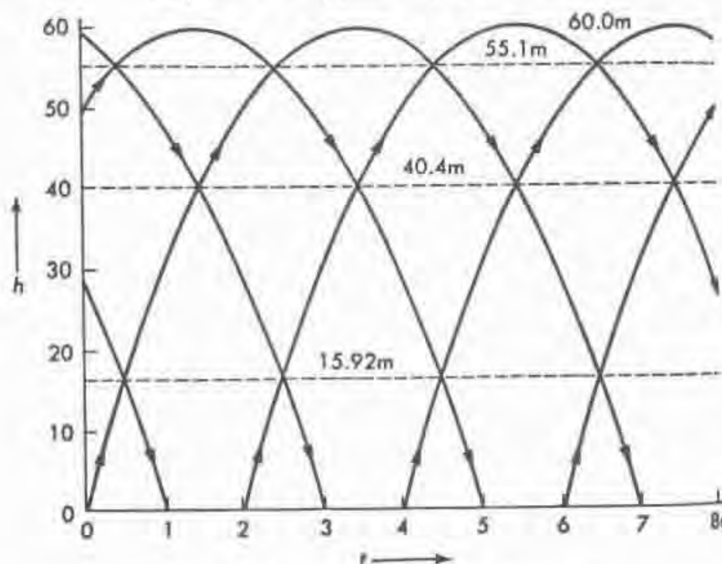
پس از دیگری ۲/۰ ثانیه به ۲/۰ ثانیه با تندی اولیه $۳۴/۳ \frac{m}{s}$ در راستای قائم به‌طرف بالا پرتاب می‌شوند . پس‌از‌آن‌که چند تیر به‌هوا پرتاب شد

الف ــ چه مدت هرتیر در هوا حرکت می‌کند تا تیر دیگر به‌آن برسد ؟

ب ــ درچه فاصله‌هائی از مبدأ پرتاب ، تیرها از کنارهم می‌گذرند ؟

پ ــ نمودار مسافت ــ زمان حرکت تیرها را رسم کنید .

جواب :
الف ــ $۰/۵^s$ ، $۱/۵^s$ ، $۲/۵^s$ ، $۴/۵^s$ ، $۵/۵^s$ ، $۶/۵^s$
ب ــ $۱۵/۹^m$ ، $۴۰/۴^m$ ، $۵۵/۱^m$



شکل ۲-۲۵ ــ نمودار ارتفاع ــ زمان برای مسأله ۲۵

پاسخ به‌پرسشهای متن بخش ۲

۲ــ۱) عملا هیچ ، جزاین‌که بخواهیم ادعاکنیم‌که حرکتی را مطالعه‌کرده‌ایم .

۲ــ۲) متر برثانیه (واحددستگاه بین‌المللی) سانتیمتر برثانیه (برای سرعتهای کم)
کیلومتر برساعت (برای وسائط نقلیه) میل[1] برساعت یا «گره» (برای هواپیمائی

---

۱ ــ میل : فاصله متوسط دو نقطه ازسطح زمین‌است که طول جغرافیایی آن دومتساوی و اختلاف عرض جغرافیائی آنها برابر یک‌دقیقه است .

میل برحسب قرارداد ۱۸۵۲ متر است . بکاربردن‌این واحد فقط در دریانوردی وهواپیمائی مجاز است .

وکشتیرانی) .

برای هواپیماهای خیلی سریع که با سرعت صوت یا بیشتر ازآن پرواز می‌کنند واحدی به‌نام «ماخ[1]» به‌کار برده می‌شود . بنابه‌قرارداد $1Mach = ۳۴۰\frac{m}{s}$

۲-۳) نه ، مسیر حرکت و وضع متحرك در هر لحظه ، با تعیین موقعیت متحرك نسبت به‌مبدأ (یانسبت به‌راستاهای معین) وهمچنین با تعیین تندی لحظه‌ای آن معین می‌شود .

۲-۴) با توجه به جدول ۲-۱ داریم :

$\frac{\Delta x}{\Delta t}(\frac{m}{s})$	Δx (m)	Δt (s)
$\frac{۰/۳۱۴}{۴} = ۰/۰۷۸۵$	۰/۳۱۴-۰=۰/۳۱۴	۴-۰=۴
۰/۰۷۸۵	۰/۶۲۸-۰/۳۱۴=۰/۳۱۴	۸-۴=۴
۰/۰۷۸۵	۰/۹۴۲-۰/۶۲۸=۰/۳۱۴	۱۲-۸=۴
۰/۰۷۸۵	۱/۲۵۶-۰/۹۴۲=۰/۳۱۴	۱۶-۱۲=۴
۰/۰۷۸۵	۱/۵۷۰-۱/۲۵۶=۰/۳۱۴	۲۰-۱۶=۴

۲-۵) اندازه‌گیری منظم ، تنظیم نتایج حاصل از اندازه‌گیری به‌صورت یك جدول ، رسم نمودار ونتیجه‌گیری .

۲-۶) از رابطهٔ $t = \frac{x}{v}$

۲-۷) کمیتهای برداری یعنی کمیتهائی که علاوه برمقدار ، دارای راستا و جهت نیز هستند مانند تندی ، شتاب ، نیرو .

کمیتهای اسکالر راستا وجهت ندارند مانند جرم ، زمان ، دما .

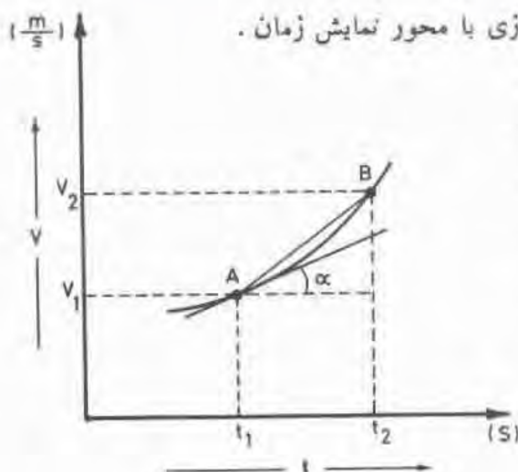
۲-۸) نه ، خارج قسمت دوبینهایت کوچك لازم نیست بینهایت کوچك باشد . مثلا يك فوتون نور در زمان بینهایت‌کوچك $۱۰^{-۲۵}$ ثانیه مسافت بینهایت‌کوچکی درحدود ۳×۱۰^{-۱۷} متر را می‌پیماید ، ولی خارج قسمت این دوبینهایت کوچك یعنی $\frac{۳ \times ۱۰^{-۱۷}m}{۱۰^{-۲۵}s}$ عدد بزرگ $۳ \times ۱۰^{۸}\frac{m}{s}$ است .

۲-۹) برای این‌که حرکت جسمی شتابدار شود ، چنان‌که می‌دانید ، باید برآن نیروئی اثرکند (قانون دوم نیوتن) . بنابراین به‌هرطریقی‌که بتوانیم برجسمی نیرو واردکنیم واین نیرو سبب حرکت جسم شود تا مدتی‌که نیرو برآن‌جسم اثر می‌کند حرکت جسم‌شتابدارخواهد بود.

Mach -۱

$$a_{۲ و ۶}=\frac{(۱۸-۵)\frac{m}{s}}{(۶-۲)s}=\frac{۱۳}{۴}=۳/۲۵\frac{m}{s^۲} \qquad (۱۰-۲$$

۲-۱۱) به‌صورت یك خط راست موازی با محور نمایش زمان .



شکل (۲-۲۱) نمودار سرعت ـ زمان

۲-۱۲) اگرشتاب متحرکی ثابت نباشد نمودار تندی‌ـزمان حرکت این متحرك خط راست نخواهد بود در این صورت اندازه شتاب لحظه‌ای متحرك در هر لحظه طبق شکل ۲-۲۱ برابر شیب خط مماس بر نمودار درآن لحظه است .

۲-۱۳) از لحاظ مقدار نه ، زیرا اندازه هردو شتاب یکی است .

۲-۱۴) به‌صورت زیر :

$v=at$

$x=\frac{v}{۲}t$

$x=\frac{۱}{۲}at^۲$

$v^۲=۲ax$

۲-۱۵) $\frac{a}{۲}$ (نصف شتاب)

۲-۱۶) ـ اشکال اندازه‌گیری زمان ، زیرا وسیله اندازه‌گیری زمان درعصر گالیله ساعت آبی بود که بوسیله آن اندازه‌گیری زمانهای کوتاه امکان نداشت .

۲-۱۷) بلی ، مثلا شکل ۲-۲۲ سقوط یك گلوله‌را نشان می‌دهدکه باعکاسی استروبوسکپی گرفته شده است . زمان بین دو وضع متوالی گلوله معلوم است مسافتهای پیموده شده نیز از روی خط‌کش مدرجی که در عکس دیده می‌شود معین می‌گردد .


شکل ۲-۲۲

۲-۱۸) این نمودار به‌صورت یك سهمی است که به‌آسانی مـی‌توانید آن را روی کاغـذ میلیمتری رسم کنید .

۲-۱۹) رابطهٔ $v=gt$ مشتق معادله $h=\frac{1}{2}gt^2$ است و فـرمول $v=\sqrt{2gh}$ از حذف t بین دو رابطه دیگر به دست می‌آید .

۲-۲۰) بلی ، مثلا اگر جسمی باتندی اولیه v_0 در راستای قائم روبه‌بالا پـرتاب شود و اندازه تندی آن در نقطه‌ای به فاصله y از مبدأ پرتاب v باشد در شرایط خلاً داریم:

$$v_0^2 - v^2 = 2gy$$

و یا $v=\sqrt{v_0^2 - 2gy}$. این جسم تا ارتفاع h بالا می‌رود و دربرگشت ، موقعی‌که به همین نقطه می‌رسد نسبت به نقطه اوج به اندازه مسافت $h-y$ پائین آمـده است بنابراین دارای تندی v' است که اندازه آن از رابطهٔ زیر حساب می‌شود :

$$v'^2 - 0 = 2g(h-y)$$

و یا $v'^2 = 2gh - 2gy$

چون $2gh = v_0^2$ است

پس $v'^2 = v_0^2 - 2gy$

و یا

$$v' = \sqrt{v_0^2 - 2gy} = v$$

اندازه این دوتندی باهم برابر ولی‌جهت آنهـا مخالف یکدیگر است (شکل ۲-۲۳).



شکل ۲-۲۳

۳

دینامیك ذره

قانونهای نیوتن در باره حرکت

دربخش پیش حرکت اجسام را از دیدگاه «سینماتیك» بررسی کردیم ، یعنی بدون این‌که علت حرکت را بیان کنیم ، کمیتهائی چون مسافت وزمان و سرعت و شتاب را تعریف کردیم وروابط میان این کمیتها را مورد بحث قراردادیم . دراین بخش می‌خواهیم علت به‌حرکت درآمدن اجسام‌را بررسی کنیم و برای این منظور باید مفاهیم جرم و نیرو را در معادلات حرکت وارد کنیم . دراین‌صورت حرکت را از دیدگاه « دینامیك » بررسی خواهیم کرد . نیوتن ، چنانکه می‌دانید ، نخستین دانشمندی بودکه به‌طور اصولی مفاهیم جرم و نیرو را در حرکت واردکرد و سه‌قانون اساسی دینامیك راکه به‌نام خود او «قوانین نیوتن در حرکت» نامیده می‌شوند وضع نمود .

شما در فیزیك سال اول با این قوانین به‌خوبی آشناشده‌اید . دراین‌جا به‌طور کاملتری بحث را دنبال خواهیدکرد .

قانونهای نیوتن دربارهٔ حرکت - دربخش ۲ ضمن مطالعه حرکت ساده اجسام متوجه شدیم که یك‌جسم می‌تواند یا درحال‌سکون باشد ، یا باسرعت ثابت برروی خط راست حرکت کند و یا دارای حرکت شتابدار باشد . سکون وحرکت یکنواخت وحرکت شتابدار پدیده‌هائی هستندکه باید علت آنها توضیح داده شود یعنی باید بتوان به پرسشهائی مانند پرسشهای زیر پاسخ داد :

چرا وقتی ظرفی مثلا روی یك میز گذاشته شده است ساکن می‌ماند ؟

چرا وقتی که‌یك‌قطعه‌یخ خشك (بی‌اکسیدکربن جامد) روی سطح افقی صیقلی ضربه‌کوتاهی می‌بیند مدت درازی به‌طور یکنواخت در امتداد خط‌راست حرکت می‌کند ؟ چرا هنگامی‌که جسمی سقوط آزاد می‌کند تندی آن مرتباً افزایش می‌یابد ؟ ومانند اینها ...

پاسخ این‌گونه پرسشهای مربوط به‌حرکت‌را به‌طورمستقیم یا غیرمستقیم می‌توان درسه قانون کلی حرکت که نیوتن‌آنها را درکتاب اصول خود بیان‌کرده است جستجوکرد .

قانون اول نیوتن

هرجسمی حالت سکون یا حرکت مستقیم‌الخط یکنواخت خود را ادامه می‌دهد مگر آنکه نیروئی (یا نیروهائی) ازخارج برآن اثرکند[1] .

تمایل اجسام به‌ماندن درحالت سکون یا در حال حرکت یکنواخت ، چنان که می‌دانید ، «ماند» یا «اینرسی» نامیده می‌شود ، و به‌همین جهت قانون اول نیوتن را « قانون ماند » یا «قانون اینرسی» نیز می‌گویند .

ماند یـا اینرسی خاصیت همهٔ اجسام است. یعنی اجسام مادی دارای این خاصیت هستند که در برابر هرتغییری که دروضع و تندی آنهـا حاصل شود مقاومت می‌کنند: آنها که ساکنند می‌خواهند درحال سکون باقی بمانند و آنها که در حرکتند می‌خواهند بدون تغییر تندی (ازلحاظ جهت ومقدار) برحرکت خود برخط راست ادامه دهند ، مگراین که نیروی (یا نیروهای) خارجی ، آنهـا را مجبور بـه‌تغییر تندی نماید .

پرسش ۳-۱ـ چرا توصیه می‌شود که سرنشینان اتومبیل هنگام حرکت درجاده‌ها کمربندنجات که در اتومبیل نصب است ببندند ؟

پرسش ۳-۲ ـ چرا درجاده‌ای کـه سطح آن یخ‌بندان است اتومبیل نمی‌تواند ازپیچ جاده تبعیت کند و درامتداد خط راست ازجاده خارج می‌شود ؟

هرچه اینرسی جسمی بـزرگتر باشد مقاومت آن در برابر تغییر وضعیت و تندی بیشتر و بنابراین نیروی لازم برای تغییردادن وضع حرکت یاسکون آن بزرگتر است. به‌همین‌علت است‌که به‌راه‌انداختن یك ترن یا یك‌کشتی ازحال‌سکون و رساندن سرعت آن به حد لازم دشوار است و نیروی زیادی بایـد اعمال شود .

پرسش ۳-۳ ـ اگراصطکاك نباشد آیا برای ثابت نگاهداشتن تندی جسم متحرك نیروئی لازم است ؟

درکتاب فیزیك سال اول برای مجسم کردن قانون ماند با آزمایشهای ساده‌ای آشنا شده‌اید‌کـه مراجعه به‌آنها توصیه می‌شود . دراین‌جا نیز برای نشان دادن خاصیت ماند آزمایشهای دیگری بیان می‌شود‌که خود به‌آسانی می‌توانید آنها را انجام دهید .

شکل ۳-۱ ـ چهارچرخـه کـوچکی رانشان می‌دهد‌که روی یك‌صفحه صیقلی (مثلا ورقه‌مقوائی صاف یا ورقه فلزی صیقلی) برسطح میزی قراردارد وبرای این‌که اینرسی آن زیـاد شود وزنه‌ای روی آن قرار داده شده است[2] . هرگاه صفحه را از زیر چهارچرخه به‌سرعت به‌طرف راست یـا چپ بکشیم



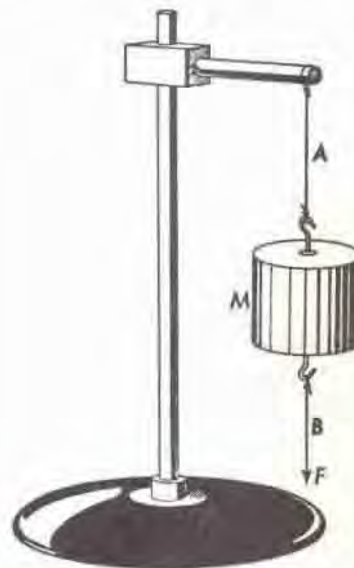
شکل ۳-۱ـ اگرصفحهٔ صاف زیرچهارچرخه را به‌سرعت از زیر آن بکشیم چهارچرخه درجای خود ساکن می‌ماند.

۱ـ بیان این قانون به‌صورتی‌که دراینجا آمده ترجمه همانست‌که نیوتن درکتاب **اصول**خود بیان کرده است .

۲ـ برای‌انجام این‌آزمایش می‌توانید ازیك‌اتومبیل کوچك ازنوع اسباب‌بازی استفاده‌کنید.

چرخها به‌علت اصطکاك کمی‌که با صفحه دارنـد می‌چرخند ولی چهارچرخه در جای خود ساکن می‌ماند .

شکل ۳-۲- وزنه یك‌کیلوگرمی M رانشان می‌دهد که توسط پاره‌نخ A به‌پایه‌ای آویزان است و ازپائین توسط پاره‌نخ دیگر B ازهمان جنس‌نخ A کشیده می‌شود اگر نیروی‌کشش F راکم‌کم وبتدریج زیاد کنیم نخ A پاره مـی‌شود ، زیرا نیروی کشش وارد برنخ A مجموع نیروی F و سنگینی وزنه M است ولی اگر نیروی F را ناگهانی به صورت یك ضربه سریع واردکنیم‌نخ B زودتر پاره می‌شودزیرا اثر نیروی F دریك لحظه کوتاه برنخ B خیلی زیاد است و پیش از آن‌که جرم M به‌سبب اینرسی خود فرصت انتقال ضربه را به‌نخ A داشته باشد نخ B پاره می‌شود .

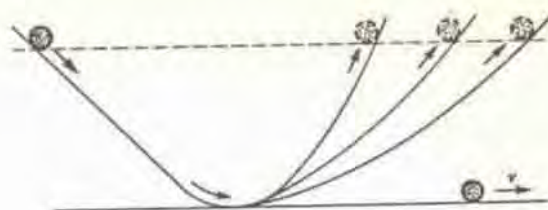


شکل ۳-۲- اگرنیروی کشش F به‌آرامی افزایش یابد نخ در A پاره می‌شود ولی اگر نیروی کشش F بسرعت و ناگهانی وارد شود نخ در B پاره می‌شود .

اینرسی‌وحرکت - آزمایشهای بالا فقط نخستین قسمت قانون اول نیوتن یعنی حالت سکون اجسام را نشان می‌دهد - برای مطالعه تجربی قسمت دوم این‌قانون باید عملا اثر هرگونه نیروی خارجی بر حرکت جسم را ازبین ببریم .

قسمت دوم قـانون اول نیوتن را یار دیگـر یادآور می‌شویم : اگرجسمی دارای حرکت‌یکنواخت باشد به‌حرکت یکنواخت خود در امتداد خط راست ادامه خواهد داد مگر این‌که تحت اثـر نیروی یا (نیروهای) خارجی قرارگیرد . مفهوم این‌قانون‌این است‌که وقتی جسمی باتندی ثابت برروی خط‌راست حرکت می‌کند مانندحالت سکون درحال تعادل‌است یعنی برآیند نیروهای وارد برآن صفراست .

گالیله پیش ازنیوتن متوجه این موضوع‌شده بود ، وی به‌هنگام مطالعه سقوط آزاد اجسام دراثر نیروی جاذبه ، پیشگوئی کرد که گلوله‌ای‌که روی یك سطح شیب‌دار صیقلی از ارتفاع معینی بدون سرعت اولیه رها می‌شود اگر پس‌از رسیدن به‌پائین سطح برروی سطح‌شیب‌دار صیقلی‌دیگری بالابرود، شیب این سطح هرچه‌باشد ، تقریباً به‌همان ارتفاعی که ازآنجا سرازیر شده است خواهد رسید . هرچه شیب سطح دوم‌کمتر باشد گلولـه مسافت بیشتری برروی آن خـواهد پیمود (شکل ۳-۳) . چنانچه گلوله پس‌از رسیدن به‌پائین سطح شیب دار اولی ، روی سطح افقی (که شیب‌آن صفراست) قرارگیرد دیگرنمی‌تواند تا ارتفاع اولیه خود بالا برود ، در نتیجه ، برروی چنین سطحی اگر اصطکاك نباشد ، بدون تغییر تندی درامتداد خط راست به‌حرکت‌خود تا ابد ادامه می‌دهد . ولـی درعمل به‌علت وجود اصطکاك ، گلوله پس از پیمودن مسافت محدودی

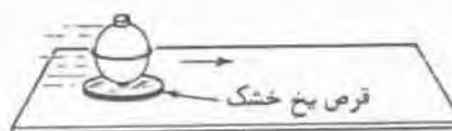


شکل ۳-۳- نمایش آزمایش اینرسی

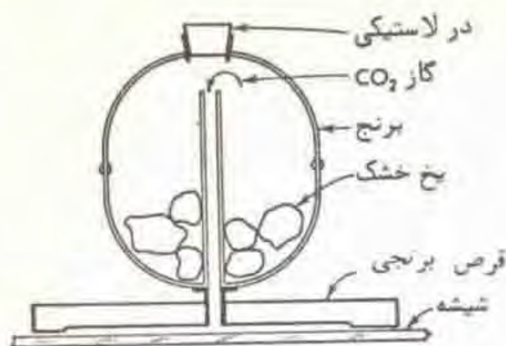
متوقف می‌شود .

پرسش ۳-۴ _ آیا وزن یك جسم درحرکت آن جسم برروی سطح افقی نقشی دارد ؟

یکی ازوسائل آزمایشگاهی جالب برای نشان دادن خاصیت اینرسی « قرص یخ خشك » است[1] (شکل۳-۴) . دراین اسباب نیروی اصطکاك بسیار کم است زیرا قرص فلزی‌که برروی صفحه شیشه‌ای افقی مـی‌لغزد عملا برلایه‌ای ازگاز CO_2 حاصل از یخ خشك قرار می‌گیرد واصطکاك جامـد با جامد ازبین می‌رود . هرگاه به‌این قرص ضربه ملایمـی



شکل ۳-۴- نشان دادن خاصیت اینرسی در جسمی که با تندی ثابت حرکت می‌کند.



شکل۳-۵- طرحی ازمقطع قائم «قرص یخ‌خشك»

وارد شود تا مدت زیادی روی سطح افقی صیقلی حرکت خواهـدکرد . بدیهی است خاصیتی‌که جسم را درحال این حرکت نگاه می‌دارد اینرسی آن‌است.

بایـد در نظر داشت که ازبین بردن نیروی اصطکاك به‌طور کامل عملی نیست . گرچه دراین آزمایش اصطکاك جامد باجامد از بین می‌رود ولی اصطکاك ملکولهای گاز وجود دارد ، مـی‌توان تصورکردکه اگر اصطکاك به‌طور کامل حذف شود چیزی مانع ادامه حرکت جسم نخواهد بود .

اینرسی وجرم _ گفتیم‌که اینرسی یك‌جسم‌یعنی مقاومتی‌که جسم درمقابل تغییر تندی از خود نشان می‌دهد . اندازه این‌مقاومت یا به‌عبارت دیگر اندازه

۱- شکل ۳-۵ طرحی‌ازمقطع قائم این اسباب را نشان می‌دهد ، یك بالون فلزی از جنس برنج یا مس به قطر تقریباً ۱۰ سانتیمترکه جدار نازکی دارد روی قرص فلزی مسطحی‌به‌ضخامت تقریباً ۲ سانتیمتر وبه قطرتقریباً ۱۵ سانتیمتر لحیم شده است. شبیه این بالونهای فلزی به‌عنوان‌شناور دربعضی وسائل (مانندکولر آبی) بکارمی‌رود ومی‌توان آن‌را از ابزارفروشان خریداری‌کرد و اسباب را ساخت سطح زیرین قرص درحدود چند دهم میلیمتر گود است . در وسط این قرص‌سوراخی تقریباً به قطر ۰/۵ سانتیمتر تعبیه شده است . یك لوله کوتاه فلزی نیز از این سوراخ گذشته و دروسط ظرف نصب‌است تامانع بسته شدن سوراخ توسط قطعه‌های یخ خشك شود ، دربالای‌بالون سوراخ بزرگتری است‌که ازآن یخ خشك‌را وارد ظرف می‌کند واین سوراخ با یك چوب‌پنبه به‌خوبی بسته می‌شود .

اینرسی «جرم» نامیده می‌شود. واحد هردو کمیت جرم واینرسی در دستگاه بین‌المللی واحدها (SI) کیلوگرم است [1].

جرم کلمهٔ آشنائی است که اغلب مترادف وزن است. گرچه وزن وجرم با هم بستگی دارند ولی دوچیز کاملا متفاوتند. وزن نیرواست یعنی نیروئی که درمیدان جاذبه برجسم وارد می‌شود؛ درصورتی که جرم اندازه مقاومتی است که جسم درمقابل شتاب گرفتن ازخود نشان می‌دهد. راجع به رابطهٔ جرم و وزن در صفحه‌های بعد گفتگو خواهیم کرد.

قانون دوم نیوتن

قانون دوم نیوتن آن‌طور که خود او بیان کرده چنین است:

هرگاه جسمی تحت تأثیر نیروی ثابتی [2] واقع شود وشتاب بگیرد این شتاب با نیرو نسبت مستقیم وبا جرم جسم نسبت معکوس دارد.

یعنی
$$a \propto \frac{F}{m}$$

رابطهٔ بالا به‌صورت یك تناسب است. اگر برای سه کمیت نیرو وجرم وشتاب واحدهای مناسبی اختیارشود قانون بالا در معادلهٔ زیر خلاصه می‌شود

$$a = \frac{F}{m}$$

ویا
$$F = m\,a \qquad (۱-۳)$$
شتاب × جرم = نیرو

این رابطه یکی از روابط مهم واساسی مکانیك است که جوابگوی بسیاری ازمسائل است. دردستگاه بین‌المللی واحدها، چنان‌که می‌دانید، شتاب برحسب متر برمجذور ثانیه ($\frac{m}{s^2}$) وجرم برحسب کیلوگرم (kg) و نیرو برحسب نیوتن (N) است. بنابراین

$$F_{(N)} = m_{(kg)} \cdot a_{(\frac{m}{s^2})}$$

ازاین رابطه «نیوتن» واحد نیرو تعریف‌شود:

$$1N = 1kg \times 1\frac{m}{s^2}$$

یعنی یك نیوتن نیروئی است که به‌جرم یك کیلوگرم شتاب یك متر برمجذور ثانیه بدهد.

پرسش ۳-۵ - چه‌نیروئی لازم است تا به‌جرم یك‌گرم شتاب یك سانتیمتر برمجذور ثانیه بدهد؟

پرسش ۳-۶ - اگردیمانسیون جرم را به M نمایش دهیم دیمانسیون نیرو چیست؟

رابطه ۳-۱ نشان می‌دهد که شتاب همواره درجهت نیرواست [3] زیرا شتاب و نیرو هردو کمیتهای برداری هستند ولی جرم یك‌کمیت اسکالر است.

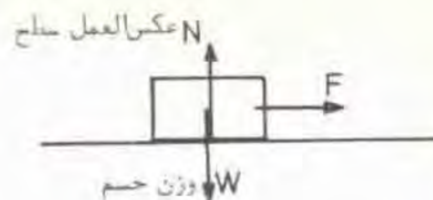
مثال - چه‌نیروی ثابت وافقی لازم‌است تا به جسمی به‌جرم ۵۰/۰kg برروی یك‌سطح افقی بدون اصطکاك شتاب $۵/۰\frac{m}{s^2}$ بدهد؟

- دراین مثال وزن جسم در حرکت آن مؤثر نیست زیرا راستای آن بر سطح افقی عمود است و با نیروی عکس‌العمل سطح که آن‌هم براین سطح عمود است خنثی می‌شود.

۱- برای به‌یادآوردن تعریف کیلوگرم به جدول واحدهای اصلی SI آخر کتاب مراجعه کنید.

۲- نیروکمیت برداری است وهنگامی ثابت است که اندازه وجهت آن هردوثابت باشند.

۳- بازهم یادآورمی‌شویم که دربیان قانونهای نیوتن جسم موردنظر درحکم ذره‌است وحرکت دورانی ندارد.



شکل ۳-۶- نیرولی که به جسم شتاب می‌دهد فقط F است .

به ازاء $m = ۵۰/۰ \, kg$ و $a = ۵/۰ \frac{m}{s^۲}$ داریم

$$F = ma = ۵۰/۰ \, kg \times ۵/۰ \frac{m}{s^۲} = ۲۵۰ \, N$$

بدیهی است اگر بریك نقطه از جسم متحرکی چند نیرو باهم اثرکند شتاب حرکت جسم متناسب با برایند این نیروها وهم‌جهت باآن خواهد بود .

وزن و جرم ـ وقتی که جسمی به جرم m درمجاورت سطح زمین به‌طور آزاد سقوط می کند تنها نیروی مؤثر برآن نیروی جاذبهٔ زمین است ، راستای این نیرو قائم وجهتش رو به‌پائین است ومی‌دانیم که این نیرو وزن جسم نامیده می‌شود . شتاب افتادن جسم ، که آن را به g نمایش داده‌ایم ، دراثرهمین نیرواست جهت این شتاب نیز به‌طرف پائین است .

اگربخواهیم قانون دوم نیوتن را برای این حرکت بکار بریم باید در رابطه $F = ma$ به جای نیروی F ، وزن جسم (که آن را به w نمایش می‌دهیم) و به‌جای a ، شتاب جاذبه (یعنی g) را قراردهیم . بنابراین رابطه $F = ma$ برای اجسامی که در اثر وزن خود باشتاب g به‌طور آزاد سقوط می کنند به‌این صورت نوشته می‌شود :

$w = m \; . \; g$ شتاب جاذبه × جرم = وزن	(۳-۲)

توجه به این نکته مهم است که : وزن یك جسم برابر mg ، یعنی حاصل‌ضرب جرم آن جسم در شتاب جاذبه است چه جسم درحال سقوط آزاد باشد وچه بدون حرکت درجائی قرارگرفته باشد .

وزن مانندنیرو کمیت برداری‌است زیرا علاوه برمقدار دارای جهت نیز هست و با واحد نیوتن سنجیده می‌شود . چون شتاب g درنقاط مختلف سطح کره زمین تغییرمی کند وزن جسم‌هم درنقاط مختلف زمین مقدارثابتی نیست .

پرسش ۳-۷ ـ فرض کنید یك سفینه فضائی سرنشین‌دار درفضا از زمین و اجرام آسمانی دیگر آن‌قدر دور است‌که هیچ میدان جاذبه‌ای برآن اثر نمی کند ودربی‌وزنی مطلق است سرنشینان این‌سفینه چگونه می‌توانند نشان دهند که اجسام درون آن درحالت سکون هم جرم خودرا دارا می‌باشند ؟

بنابر رابطهٔ $w = mg$ می‌توان گفت که g در واقع وزن واحد جرم است . دراین صورت وزن یك جسم برابراست باحاصل‌ضرب‌جرم جسم دروزن واحد جرم . براساس این تعریف g برحسب نیوتن بر کیلوگرم $\left(\frac{N}{kg}\right)$ بیان می‌شود . اگر g را برابر $۹/۸۰ \frac{N}{kg}$ بگیریم وزن یك‌وزنه به‌جرم یك کیلوگرم برابر ۹/۸۰ نیوتن است وچنانکه می‌دانید این‌نیرو را «یك کیلوگرم‌نیرو[1]» می‌نامند .

۱ـ تعریف استاندارد کیلوگرم نیرو چنین است ، $1 \, kgf = ۹/۸۰۶۶۵ \, N$

اندازه حرکت وقانون دوم نیوتن ـ می‌دانید که حاصل‌ضرب جرم یك جسم در تندی آن را اندازه حرکت [1] جسم گویند یعنی:

$$\text{تندی} \times \text{جرم} = \text{اندازه حرکت} \qquad (۳-۳)$$
$$P = m \cdot v$$

اندازه حرکت P یك کمیت برداری است که با تندی v هم‌جهت [2] و دیمانسیون آن MLT^{-1} است وباواحد کیلوگرم متر بر ثانیه $\left(kg\frac{m}{s}\right)$ سنجیده می‌شود.

باتوجه به‌تعریف اندازه حرکت می‌توان گفت که تمام اجسام متحرك دارای اندازه حرکت هستند. اندازه حرکت یك جسم کوچك که باتندی زیاد حرکت می‌کند ممکن است برابر اندازه حرکت یك جسم بزرگ که با تندی کم حرکت می‌نماید باشد. مثلا اندازه‌حرکت یك گلوله یك کیلوگرمی که باتندی ۶۰ $\frac{m}{s}$ حرکت می‌کند برابر اندازه‌حرکت یك انسان به‌جرم ۶۰ کیلوگرم است که باتندی ۱ $\frac{m}{s}$ راه می‌رود.

پرسش ۳-۸ ـ اندازه حرکت یك گلوله‌تفنگ به‌جرم ۱۲ گرم که باتندی ۴۰۰ $\frac{m}{s}$ پرتاب می‌شود چه اندازه است؟

با استفاده از مفهوم اندازه حرکت، چنانکه می‌دانید، می‌توان قانون‌دوم نیوتن را به‌طرز بهتری به‌صورت زیر بیان کرد:

تغییر اندازه حرکت یك جسم در واحدزمان برابر است با نیروئی که برجسم وارد می‌شود و درجهتی است که نیرو برجسم اثر می‌کند. یعنی:

$$\text{نیرو} = \frac{\text{تغییر اندازه حرکت}}{\text{زمان تغییر}}$$

و یا

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} \qquad (۴-۳)$$

اگرجرم جسم‌را ثابت بگیریم رابطهٔ بالارا به صورت زیر می‌توانیم بنویسیم:

$$F = m\frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad (۵-۳)$$

چنانچه‌نیروی F درمدتی که برجسم اثرمی‌کند ازلحاظ جهت ومقدارثابت باشد $a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$ که شتاب حرکت است ثابت می‌ماند و چون $a=\frac{v-v_0}{t}$ است بنابراین

$$F = m\frac{v-v_0}{t} \qquad (۶-۳)$$

مثال‌ـ اتومبیلی به‌جرم ۱۲۰۰٫۰ kg باسرعت ۴۵٫۰ $\frac{km}{h}$ درجاده مستقیم وافقی درحرکت است. چه نیروی ثابتی لازم است تا درمدت ۸٫۰ ثانیه سرعت آن را به ۹۰٫۰ $\frac{km}{h}$ برساند؟

ـ داریم

$m = 1200\,kg$ و $v_0 = \frac{45\times 1000}{3600} = 12.5\frac{m}{s}$

و

$t = 8.0\,s$ و $v = \frac{90.0\times 1000}{3600} = 25.0\frac{m}{s}$

۱ـ اصطلاح اندازه حرکت از زمان نیوتن بکار رفته است و امروز اصطلاح Momentum به‌جای آن به‌کار می‌رود.

۲ـ می‌توان گفت که اندازه حرکت P برداری است که بزرگی آن m برابر بزرگی بردار V است.

بنابراین

$$F = m\frac{v - v_0}{t}$$

$$= ۱۲۰۰/۰\,kg \frac{۲۵/۰\frac{m}{s} - ۱۲/۵\frac{m}{s}}{۸/۰s}$$

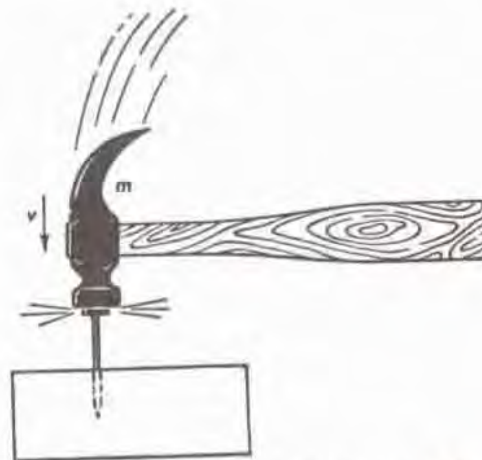
$$= \frac{۱۵۰۰۰\,kg\frac{m}{s^۲}}{۸/۰} = ۱۸۷۵N$$

ضربه

اگر دوطرف رابطهٔ $F = m\frac{v - v_0}{t}$ را در زمان t ضرب کنیم رابطهٔ جدیدی بین کمیتهای نیرو وجرم وتندی‌وزمان به‌دست می‌آید که مفهوم دیگری دارد:

$$F \cdot t = mv - mv_0 = m\Delta v \qquad (۷-۳)$$

$F \cdot t$ یعنی حاصلضرب نیرو درمدت اثر نیرو را «ضربه» می‌نامند. رابطهٔ (۳−۷) نشان‌می‌دهد که اگر برجسمی ضربه‌ای (چه در زمانی کوتاه وچه درمدتی دراز) وارد شود و در اثر این ضربه تندی جسم تغییرکند اندازهٔ ضربه برابر با میزان «تغییر اندازهٔ حرکت» جسم خواهد بود.



شکل۳−۷− ضربه چکش میخ را در تخته فرو می‌برد

وقتی که جسمی ازحالت سکون در اثر ضربه به‌حرکت در می‌آید سرعت اولیه آن $v_0 = ۰$ است و معادله (۳−۷) به‌صورت زیر درمی‌آید.

$$Ft = mv \qquad (۸-۳)$$

یعنی جسم ساکن پس از دریافت ضربه Ft، اندازه حرکت mv را پیدا می‌کند. عکس این مطلب نیز درست‌است، یعنی‌جسم متحرکی هم که دارای اندازه حرکت mv است بـا اعمال ضربه $-Ft$ متوقف می‌شود. علامت منفی دراین‌جا نشان می‌دهد که نیروی F درخلاف جهت‌تندی v برجسم اثرمی‌کند.

مثال میخ وچکش که در شکل ۳−۷ نشان‌داده شده است مفهوم ضربه را به‌خوبی نشان می‌دهد.

سرچکش به‌جرم m باسرعت v به‌میخ برخورد می‌کند ونیروی بزرگی در زمان کوتاه t کـه کسر کوچکی از ثانیه است برمیخ وارد می‌سازد و در اثر این‌ضربه میخ کمی درتخته‌فرو می‌رود. اگر F اندازه متوسط نیروی وارد برمیخ دراین زمان‌کوتاه t باشد اندازه ضربه برابر است با:

$$\text{ضربه} = Ft \qquad (۹-۳)$$

مثال ـ جرم سر یك‌چکش ۱/۵۰ kg است و باسرعت $۶/۰\frac{m}{s}$ به‌سرمیخ بزرگی زده می‌شود و میخ در یك تخته فرو می‌رود. اگر مدت ضربه ۰/۰۰۱۰s باشد مطلوبست:

الف ـ اندازه ضربه

ب ـ اندازه متوسط نیروی وارد برمیخ

ـ داریم $m = ۱/۵۰kg$ ، $v = ۶/۰\frac{m}{s}$

و $t = ۰/۰۰۱۰s$

الف ــ برای محاسبه ضربه کافی است در رابطهٔ $Ft=mv$ به‌جای m و v مقادیر داده شده را بگذاریم

$$Ft=mv=۱/۵۰\,kg\times ۶/۰\,\frac{m}{s}=۹/۰\,kg\frac{m}{s}$$

ب ــ اندازه متوسط نیروی F که بر میخ اعمال می‌شود برابر است با

$$F=\frac{mv}{t}=\frac{۹/۰\,\frac{kgm}{s}}{۰/۰۰۱۰\,s}$$
$$=۹۰۰۰\,N=۹/۰\times ۱۰^{۳}\,N$$

نیروی ۹۰۰۰ نیوتن خیلی بـزرگ به‌نظر می‌رسد ولی زمان تاثیر آن خیلی کوتاه است .

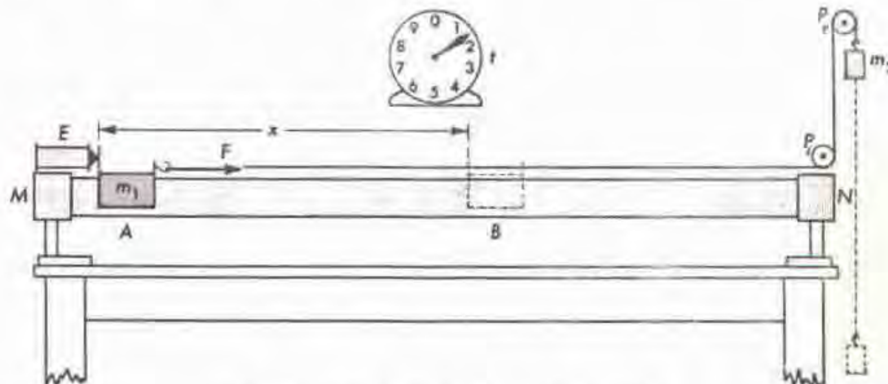
پرسش ۳-۹ ــ به نظر شما چگونه مـی‌توان اندازه این نیرو را عملا آزمود ؟

نیروئی که چکش را از حرکت بازمی‌دارد نیروی مقاومت تخته است که جهت آن خلاف جهت حرکت چکش (یعنی روبالا) است .

تحقیق تجربی قانون دوم نیوتن

برای نشان‌دادن رابطهٔ بین نیروی ثابت‌وارد بریك جسم وتغییر اندازه حرکت حاصل ازاین نیرو می‌توان آزمایشی راکه طرح آن درشکل ۳ــ۸ نمایش داده شده است انجام داد :

جسم کوچك m_1 توسط نخی که از شیارهای دوقرقره P_1 و P_2 گذشته و به وزنه کوچك آویزان m_2 متصل است ، برروی ریل مستقیم وافقی MN کشیده می‌شود[1] وشتاب می‌گیرد . هوای متراکم به درون ریل که توخالی است دمیده می‌شود و از سوراخهای ریزی که سراسر رویه بالائی ریل تعبیه شده‌است خارج می‌گـردد . خروج هوا ازسوراخها سبب می‌شود کـه جسم m_1 در مسیر حرکت خود همواره برلایه‌ای ازهوا قرار می‌گیرد وتقریباً بدون اصطکاك برروی ریل می‌لغزد . این دستگاه که بهتر است آن را تخت هوا بنامیم وسیله جدیدی است که امروزه در آزمایشگاههـای فیزیك بـرای انجام آزمایشهای مربوط به‌مکانیك به‌کار می‌رود .



شکل ۳ــ۸ــ تخت هوا برای مطالعه دینامیك حرکات

۱ــ معمولا جسم m_1 به‌شکل ناوه کوچکی ساخته می‌شود که به‌طور وارونه برپشته منشوری‌شکل ریل سوار می‌شود .

در آغاز آزمایش جسم m_1 توسط آهن ربای الکتریکی E نگاهداشته شده است . در لحظه‌ای که کلید مدار الکتریکی آهن‌ربا باز می‌شود جسم m_1 به راه مــی‌افتد و در همین لحظه ساعت الکتریکی شروع بکارمی‌کند وموقعی‌که جسم m_1 به‌نقطه‌ای مثلا B که درفاصله مشخصی از A نشان شده است می‌رسد ساعت متوقف می‌گردد و زمانی که مسافت $AB=x$ پیموده شده‌است مشخص می‌شود. آزمایش را مــی‌توان چندین‌بار برای فواصل مختلف تکرار کرد و با تعیین x و t و جرمهای m_1 و m_2 و صرفنظرکردن ازجرمهای نخ و قرقره‌ها و اصطکاك آنها $\frac{\Delta(mv)}{t}$ حساب‌کرد . دراین آزمـایش نیروی شتاب دهنده m_2g است وجرمی‌که دراثر این نیرو به‌حرکت درمی‌آید (باصرف‌نظرکردن از جرم نخ و قرقره‌ها) m_1+m_2 است بنابراین شتاب حرکت از رابطهٔ زیر به‌آسانی حساب می‌شود :

$$a=\frac{m_2g}{m_1+m_2}$$

مثلا به ازاء

$$g=9/80\frac{m}{s^2} \quad \text{و} \quad (\text{۲۰ گرم})\, m_2=0/020kg$$

و

$$m_1=1/000kg$$

$$a=\frac{0/020kg\times 9/80\frac{m}{s^2}}{1/020kg}$$

$$=0/192\frac{m}{s^2}=19/2\frac{cm}{s^2}$$

قانون سوم نیوتن

قانون اول نیوتن رفتار یك جسم را درحالت تعادل‌بیان می کند و این حالتی‌است که برآیندنیروهای وارد برآن‌جسم صفر است . قانون دوم نیوتن‌بیان می‌کندکه اگر نیرو (یا برآیند نیروها) صفر نباشد چگونه درحرکت جسم تغییرحاصل می‌شود . قانون سوم نیوتن اثر متقابل دوجسم را بریکدیگـر بیان می کند . ترجمه کلمه به‌کلمه قانــون سوم ازکتاب اصول نیوتن چنین است :

برای هر عملی عکس‌العملی است مساوی با آن و درخلاف جهت‌آن . به‌عبارت دیگر عملهای دو جسم بریکدیگر همواره مساوی و در جهت مخالف هم است .

پرسش ۳-۱۰– منظور ازاصطلاحات عمل و عکس‌العمل دربیان این قانون چیست ؟

درموردکاربرد این قانون درکتاب فیزیك سال اول با چند مثال مــانند عقب زدن تفنگ به‌هنگام خروج گلوله ازآن ، حرکت موشکها وهواپیماهای جت، راه رفتن روی زمین و .... آشنا شدید. بسیاری از مشاهدات روزانــه قانون سوم نیوتن را آشکار می‌سازند:

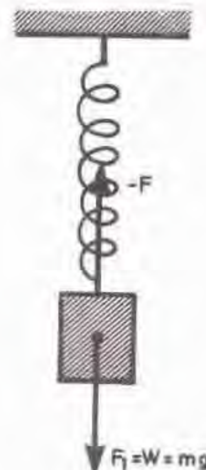
– وقتی‌که گوی باچوگان زده می‌شود، چوگان یك نیروی F (عمل) به‌گوی‌وارد می‌سازد. گوی‌هم نیروئی برابر F – که مساوی و در خلاف جهت F است(عکس‌العمل) برچوگان وارد می کند(شکل۳-۹) ضربه Ft ازطرف چوگان به‌گوی ساکـن اندازه حرکتی برابر mv می‌دهـد و گوی بـا سرعت زیاد v به حرکت درمی‌آید . ضربه Ft – ازطرف گوی‌برچوگان سبب می‌شودکه اندازه حرکت‌اولیه چوگان کاهش یابد ولی .در هرصورت ، تغییر اندازه حرکت‌گوی برابر تغییر اندازه حرکت چوگان است .

– وقتی‌که وزنه‌ای به جرم m به فنری‌آویزان وبه‌حال تعادل است ، وزنه با نیروی F کـه برابر



شکل ۳-۹- نیروئی که گوی به چوگان وارد می‌کند مساوی و در خلاف جهت نیروئی است که چوگان برگوی وارد می‌سازد

وزنش می‌باشد فنر را به‌طرف پائین می‌کشد (شکل ۳-۱۰) . فنرهم که دراثراین نیرو کشیده شده است با نیروی کشسانی F — وزنه را به‌طرف بالا می‌کشد.



شکل ۳-۱۰- تساوی نیروهای عمل وعکس‌العمل سبب تعادل جسم آویخته به فنر می‌شود .

چون برآیند این دونیرو صفر است وزنـه به حال تعادل است .

درپاره‌ای ازموارد اثرمتقابل نیروها به‌آسانی مشاهده نمی‌شود . مثلا وقتی که یك سیب ازشاخه درخت‌جدا می‌شود دراثرنیروی جاذبه‌ای که ازطرف زمین برآن‌وارد می‌شود به‌طرف‌زمین کشیده می‌شود. زمین‌هم ، در مدتی که سیب سقوط مـی‌کند در اثر نیروی جاذبه سیب‌که مساوی نیروی جاذبـه زمین و درخلاف جهت‌آن‌است به‌طرف‌سیب‌کشیده می‌شود، ولی نظر به‌بزرگی جرم زمین درمقابل سیب حرکت آن به سوی سیب محسوس نیست .

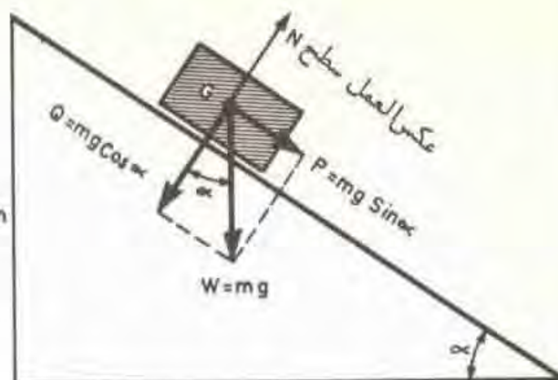
پرسش ۳-۱۱ - دراین مثال نقطه اثر نیروی جاذبه سیب برزمین کجاست ؟

توجه به‌این نکته مهم است که نیروهای عمل وعکس‌العمل همواره بردوجسم‌اثر می‌کنند نه بریك جسم.

چندمثال ازکاربردهای قوانین نیوتن

مثال ۱ - محاسبهٔ شتاب‌حرکت یك‌جسم‌که فقط دراثر وزن خود برسطح شیب‌دار بدون اصطکاك حرکت می‌کند .

درنظر بگیریم که جسمی به جرم m و به‌وزن $w=mg$ بر روی سطح شیب‌داری‌که با سطح افق زاویه α می‌سازد در اثر وزن خود به‌طرف پائین می‌لغزد (شکل ۳-۱۱)، نیروی وزن mg راکه در راستای قائم برجسم اثر می‌کند ، چنانکه می‌دانید، می‌توان به دو همنه عمود برهم $P=mg\sin\alpha$ و $Q=mg\cos\alpha$ تجزیه کرد . همنه $Q=mg\cos\alpha$ که عمود برسطح شیب دار است جسم را بـرسطح می‌فشارد وباعکس‌العمل سطح که‌آن را به N نمایش داده‌ایم وآن هم عمودبرسطح است خنثی می‌شود .



شکل۳-۱۱- یك‌جسم برروی سطح شیب‌دار بدون اصطکاك در اثر نیروی mg Sin α شتاب می‌گیرد

همنه $P=mg\sin\alpha$ سبب حرکت جسم بـرسطح شیب‌دار می‌گردد و اگر اصطکاك سطح ناچیز باشد تنها نیروئی است‌که به‌جسم شتاب می‌دهد و بنا به قانون دوم نیوتن خواهیم داشت :

$$mg\sin\alpha = ma$$

ویا

$$a = g\sin\alpha \qquad (۳-۱۰)$$

می‌بینیم کـه این شتاب بستگی به‌جرم جسم ندارد. یعنی هرجسمی‌که تحت اثر وزن خود بدون اصطکاك برروی سطح شیب‌دار حرکت‌کندشتاب‌آن $g\sin\alpha$ است . بدیهی است بـه ازاء $\alpha=۹۰°$ داریم $a=g$ و این همان حالت سقوط آزاد است که در بخش ۲ در بارهٔآن به‌تفصیل گفتگو کرده‌ایم .

مثال۲-حرکت‌آسانسورـآسانسوری‌که‌کل‌جرم آن (جرم‌اطاق ومحتویاتش) M است توسط کابلی که به بالای آن متصل است بالا و پائین می‌رود . مطلوبست نیروی کشش روبه‌بالای کابل وقتی‌که آسانسور :

الف ـ باشتاب ثابت a بالا می‌رود .

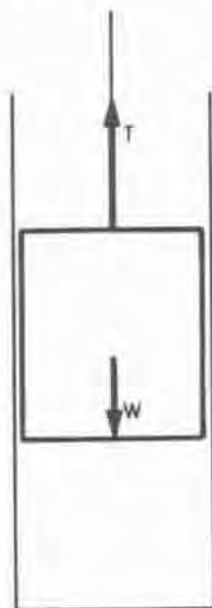
ب ـ باتندی ثابت بالا می‌رود .

پ ـ باشتاب ثابت a پائین می‌آید .

ت ـ باتندی ثابت پائین می‌آید .

ـ نیروی کشش کابـل آسانسور را به T و وزن‌آسانسور را به W نشان می‌دهیم (شکل۳-۱۲) T همواره روبه‌بالا و W روبه‌پائین است ، بنابراین اگر اصطکاکی در کار نباشد نیروی مؤثر وارد بر آسانسور (یعنی بـرآیند نیروها) $T-W$ است و طبق قانون دوم نیوتن خواهیم داشت :

$$T - W = Ma \qquad (۳-۱۱)$$



شکل۳-۱۲- طرح ساده‌ای ازنمایش نیروها درآسانسور

برای آسانی‌کار محاسبه ، جهت رو به‌بالا را مثبت می‌گیریم :

الف- وقتی‌که آسانسورباشتاب a بالامی‌رود $a>۰$ و $T>W$ است و داریم

$$T = W + Ma = Mg + Ma$$

و یا

$$T = M(g+a) \qquad (۳-۱۲)$$

مثلاً اگر $M=1500\,kg$ و $a=1/5\,\frac{m}{s^2}$ باشد

$$T=1500\,kg\,(9/8+1/5)\,\frac{m}{s^2}=16950\,N$$

که با دو رقم معنی‌دار درحدود 17×10^3 نیوتن است.

ب- وقتی که آسانسور با تندی ثابت بالا می‌رود $a=0$ است. درنتیجه

$$T=w=Mg$$

پ- وقتی که آسانسور باشتاب ثابت a پائین می‌آید $a<0$ و $T<w$ است درنتیجه

$$T-w=-Ma$$

یا $T=w-Ma=Mg-Ma$

و یا $T=M(g-a)$ (۳-۱۳)

ت- آسانسور هنگامی که با تندی ثابت پائین می‌آید $a=0$ است بازهم مانند حالت ب:

$$T=w=Mg$$

اگر شخصی به‌جرم m دراین آسانسور سوار باشد، درحالتی که آسانسور با شتاب ثابت a بالا می‌رود نیروئی که از کف آن بر شخص وارد می‌شود واورا بالا می‌برد (یعنی عمل) برابر $m(g+a)$ است. این نیرو بیش از وزن شخص (mg) است و طبق قانون سوم نیوتن نیروئی هم که شخص در این حالت بر کف آسانسور وارد می‌کند $-m(g+a)$ بوده و بیش از وزن وی است، دردوحالتی که حرکت آسانسور، چه موقع بالارفتن وچه‌هنگام پائین‌آمدن، یکنواخت است نیروی عکس‌العمل شخص بر کف آسانسور $-mg$ است. وقتی‌هم که آسانسور باشتاب a پائین می‌آید عکس‌العمل شخص بر کف آن $-m(g-a)$ است که کمتر از وزن او است. بدیهی است اگر فرضاً آسانسور باشتاب g پائین آید نیروی عکس‌العمل شخص بر کف آسانسور صفر می‌شود.

مثال ۳ - دو وزنه به جرمهای نامساوی M_1 و M_2 $(M_1>M_2)$ مطابق شکل ۳-۱۳ به‌دوسر ریسمانی که ازشیار قرقره P گذشته‌است آویزان است اگر جرم ریسمان وجرم قرقره واصطکاک آن ناچیز باشد مطلوبست:

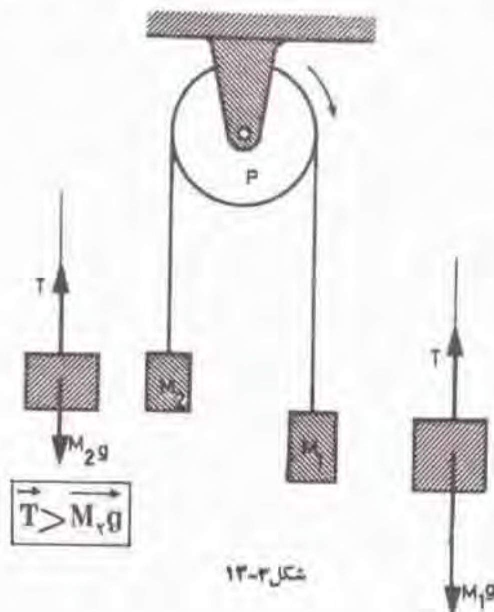
الف - کشش ریسمان به‌هنگام حرکت وزنه‌ها

ب - شتاب حرکت وزنه‌ها

- چون M_1 بزرگتر از M_2 است، M_1 پائین می‌آید و M_2 بالا می‌رود.

نیروی کشش ریسمان را که دردوطرف قرقره یکی است به T نمایش می‌دهیم برای محاسبه حرکت هریک ازوزنه‌ها را جداگانه درنظر می‌گیریم:

وزنه M_1 در اثر وزن خود (M_1g) به‌طرف پائین کشیده می‌شود ولی نیروی کشش T با سقوط آزاد آن مخالفت می‌کند. درنتیجه نیروی مؤثری که به‌آن شتاب می‌دهد تفاضل این دو نیرو یعنی



شکل ۳-۱۳

M_1g-T است و طبق قانـون دوم نیوتن خواهیم داشت :

$$M_1g-T=M_1a$$

و یا

$$T=M_1g-M_1a \quad (۱۴-۳)$$

وزنه M_2 دراثر نیروی کشش T بالا کشیده می‌شود ولی وزن‌آن (M_2g) مخالفت مـی‌کند . پس نیروی مؤثر بروزنه M_2 که به‌آن شتاب می‌دهد $T-M_2g$ است وچون‌شتاب وزنه M_2 همان‌شتاب وزنه M_1 است خواهیم داشت :

$$T-M_2g=M_2a$$

و یا

$$T=M_2g+M_2a \quad (۱۵-۳)$$

از ترکیب دو رابطه (۳-۱۴) و (۳-۱۵) نتیجه می‌شود :

$$\begin{cases} a=\frac{M_1-M_2}{M_1+M_2}g \\ T=\frac{2M_1M_2}{M_1+M_2}g \end{cases} \quad (۱۶-۳)$$

و

مثلا به ازاء $M_1=0/250kg$ و $M_2=0/200kg$ و $g=9/80\frac{m}{s^2}$:

$$a=\frac{0/250kg-0/200kg}{0/250kg+0/200kg}\times 9/80\frac{m}{s^2}=1/09\frac{m}{s^2}$$

$$T=\frac{2\times 0/250kg\times 0/200kg}{0/450kg}\times 9/80\frac{m}{s^2}=2/18N$$

خودتان آزمایش کنید

۱ـ به‌کمک ماشین‌آتوود[1] ضمن تحقیق قانون دوم نیوتن g شتابِ جاذبه را بدست‌آورید .

ماشین آتوود اسبابی است کـه براساس قانون دوم نیوتن برای اندازه‌گیری g (شتاب جاذبـهٔ زمین) در آزمایشگاههای فیزیك طرح‌ریزی شده است .

این اسباب کـه نمونه‌ای ازآن در شکل (۳-۱۴) نمایش داده شده معمولا درآزمایشگاه فیزیك مـوجود است و تشکیل شده است ازدو وزنه به‌جرمهای مساوی کـه به‌دوسر رشته‌نخ سبکی که از روی قرقرهٔ سبك وبدون اصطکاکی می‌گذرد آویزانند . هرگاه روی یکی از وزنه‌ها سربار کوچکی گذارده شود دستگاه حرکت مـی‌کند و مسافتی که هریك از وزنه‌ها مـی‌پیماید از روی خطکش مدرجی به‌طول تقریبی ۲ متر اندازه‌گرفته می‌شود .

درصورتی کـه چنین دستگاهی درآزمایشگاه شما موجود نیست می‌توانید نمونه ساده‌تری از آن را با هم درآزمایشگاه تهیه کنید .

۱- Atwood

یکی از وزنه‌ها را مقابل صفر خطکش نگاهدارید و سربار کوچکی روی آن قرار دهید و دستگاه را آزاد بگذارید تا حرکت کند و با قرار دادن یك صفحه در طول خطکش که حرکت را متوقف می‌کند فواصل پیموده شده در زمانهای متوالی ۱ ثانیه ، ۲ ثانیه و ۳ و.... را اندازه بگیرید ونتایج اندازه‌گیری را در جدولی مانند جدول زیر ببرید وآزمایش را بـا یك سربارمعین چندبار تکرار وشتاب میانگین راحساب کنید .

جرم سربار m	زمان حرکت t	مسافت طی شده x	$a=\frac{2x}{t^2}$
شتاب میانگین			$\bar{a}$

اگرجرم هریك از دو وزنه را به M وجرم سربارارا به m نمایش دهیم جرم مجموع دو وزنه وسربار $2M+m$ است ونیروئی‌که این‌جرمها را به حرکت درمی‌آورد mg (وزن‌سربار) است . اگر ازجرم نخ وقرقره و اصطکاك صرفنظرکنیم شتاب حرکت برابر است با :

$$a=\frac{mg}{2M+m}$$

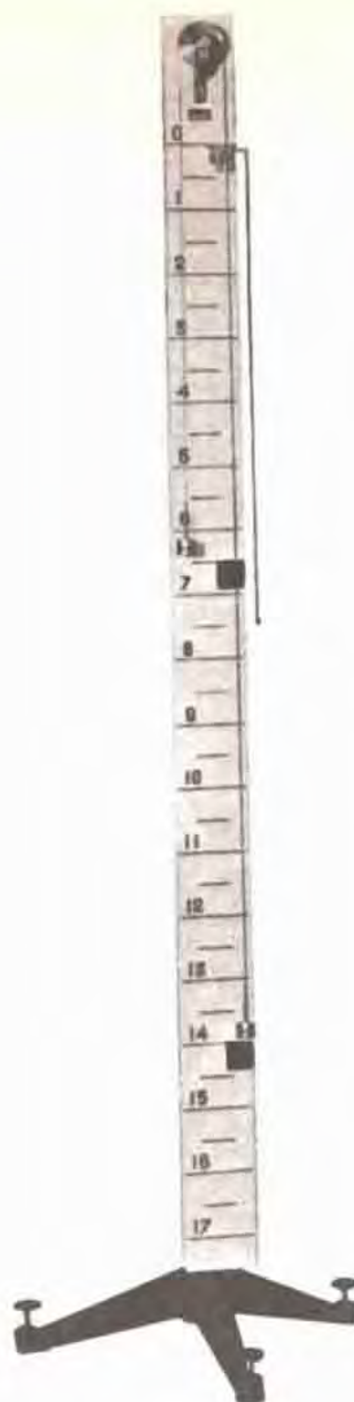
باتعیین m و M با ترازو و دانستن a ، شتاب جاذبه (g) را حساب‌کنید و درصورتـی که با $9/8\ \frac{m}{s^2}$ اختلافی مشاهده می‌کنید علت‌را توضیح دهید .

۲ـ اگرتخت هوا یاوسیله‌ای مانندآن درآزمایشگاه دراختیار دارید به‌وسیلهٔ آن قانونهای نیوتن را تحقیق‌کنید .

به این پرسشها پاسخ دهید

۱ ــ مفهومی راکه ازنیرو استنباط‌کرده‌اید دریك جمله بیان‌کنید .

۲ ــ با توجه به دیمانسیون نیرو بگوئید سه واحد اصلی‌که در تعریف واحد نیرو به‌کار رفته‌اند کدامند ؟



شکل ۳-۱۴ ماشین آتوود

۳ - برجسمی ، مثلا یک کتاب ، که روی میز قرار گرفته است چه نیروهائی وارد می‌شوند؟ این نیروها را با انتخاب مقیاس مناسبی به وسیلهٔ بردار نمایش دهید .

۴ ـ يك بالون محتوى گاز سبك در هوا معلق و بدون حركت و به حال تعادل است . نظر خود را دربارهٔ نيروهائى كه برآن وارد مى‌شوند بيان كنيد .

۵ ـ وقتى كه يك اتومبيل باسرعت ثابت‌برجادهٔ مستقيم وافقى حركت مى‌كند چه‌نيروهائى باهم درحال تعادل ديناميكى هستند ؟

۶ ـ براساس قانون اول نيوتن توضيح دهيد چرا وقتى يك اتوبوس ناگهان ازحالت سكون به‌حركت درمى‌آيد مسافران آن به‌عقب رانده مى‌شوند وچرا هنگامى كه درحركت‌است وناگهان ترمز مى‌كند مسافران آن به‌جلو رانده مى‌شوند ؟

۷ ـ اين جمله درست است يا نادرست ؟ «قانون دوم نيوتن در صورتى صادق است كه نيروى اصطكاك وجود نداشته باشد » .

۸ ـ آيا تعريفى كه براى جرم دراين‌بخش شده است محدود به‌جرم اجسامى است‌كه در حال سكون هستند ؟

۹ ـ براساس قانون دوم نيوتن تعريف تازه‌اى براى شتاب غير از تعريفى‌كه دربخش ۲ براى آن شده است بيان كنيد .

۱۰ ـ علاوه برتعريفى كه براى جرم دراين بخش شده است آن را به صورت زير نيز تعريف‌كرده‌اند « جرم‌هرجسم مقدار ماده‌اى است‌كه جسم را تشكيل ميدهد » بنابراين براى‌جرم يك جسم دو وجه متمايز درنظر گرفته شده است ؛ يكى اندازهٔ مقاومتى‌كه جسم در مقابل تغيير تندى ازخود نشان مى‌دهد وديگرى مقدار ماده‌اى‌كه جسم را تشكيل مى‌دهد . كداميك از اين دوتعريف دقيق‌تر است ؟ به‌نظرشما آيا بهتر نيست‌كه به‌طور كلى تعريف اول را اينرسى وتعريف دوم را جرم بناميم ؟ نظرخود را با استدلال بيان كنيد .

۱۱ ـ دريك آزمايش براجسامى به‌جرمهاى متفاوت عملا نيروى يكسان در زمان مساوى وارد مى‌شود و آن‌ها را به‌حركت درمى‌آورد . چگونه مى‌توان فهميد كه نيروى وارد برآن‌ها يكسان است ؟

۱۲ـ بنا بـه گفته بعضى از فيزيكدانان وزن يك جسم برابر نيروئى است كـه جسم بر تكيه‌گاه خود واردمى‌كند اين‌تعريف‌را بامثالهايى‌كه دراين‌بخش باآنهامواجه شده‌ايدتطبيق‌دهيد.

۱۳ ـ با محاسبه نشان دهيد كه نسبت وزن دوجسم دريك نقطه برابر نسبت جـرم آن دو جسم است .

۱۴ ـ چرا با آن‌كه جرم يك‌جسم هرجاكه باشد يكى‌است وزن‌آن ازنقطه‌اى به‌نقطهٔ ديگر تغيير مى‌كند ؟

۱۵ ـ با محاسبه نشان دهيدكه اگر ازيك نقطه بـه فاصلهٔ h ازيك سطح افقـى جسمى برروى سطح شيب‌دار بدون اصطكاكى بدون سرعت اوليه رهـا شود و بر روى آن بلغزد شيب

سطح هرچه باشد موقعی که جسم به‌پایین سطح می‌رسد سرعت آن برابر $\sqrt{2gh}$ است که بستگی به زاویهٔ شیب سطح ندارد .

۱۶ - چرا اندازهٔ شتاب جسمی که در شرایط خلأ به‌طرف بالا پرتاب می‌شود هم در موقع بالا رفتن وهم درموقع پائین‌آمدن برابراست .

۱۷ - یك فضانورد در سفینهٔ فضایی خود به‌گرد زمین می‌گردد . شتاب جاذبهٔ زمین در ارتفاعی که این سفینه حرکت می‌کند نصف شتاب جاذبه درسطح زمین‌است ازمطالب زیر کدامها دربارهٔ این فضانورد درست است ؟

الف - وزن او صفر است .　　　ب - جرم او صفر است .

پ - وزن اونصف وزنش‌درسطح زمین‌است .　ت - جرم اونصف جرمش درسطح‌زمین‌است.

ج - وزن اوبرابروزنش درسطح زمین‌است.　چ - جرم او برابر جرمش درسطح زمین‌است.

۱۸ - جسمی از روی یك میز پایین می‌افتد . وقتی که به‌نیمه راه مسیر خود مـی‌رسد از مطالب پرسش ۱۷ کدامها درموردآن صدق می‌کنند .

۱۹ - بایك ترازوی آزمایشگاه ، آیا جرم یك جسم اندازه گرفته می‌شود یا وزن آن؟ با یك نیروسنج فنری کدام یك ؟ توضیح دهید اگر این اندازه‌گیریها در سطح کره ماه انجام شود چه‌تغییری درنتایج اندازه‌گیری که درزمین بدست آمده است حاصل می‌شود ؟

۲۰ - چرا اغلب گفته می‌شود فضانوردان در سفینه‌های فضایی که به‌گرد زمین می‌گردند درحالت بی‌وزنی هستند ؟

۲۱ - معمولاً ادعا می‌شود جسمی که به‌طور آزاد سقوط می‌کند بدون وزن است زیرا هراسباب اندازه‌گیری وزن که باجسم درحال سقوط آزاد باشد صفر را نشان می‌دهد . این‌تعبیر کاملا قانع‌کننده نیست به‌این دلیل که معمولا انسان به‌هنگام سقوط آزاد (مانند پایین پریدن از تختهٔ شیرجه دراستخرشنا یا پایین‌افتادن ازیك بلندی) همان احساس درونی را داردکه درحالت بی‌وزنی واقعی، مثلادراعماق فضا دور ازهرستاره یاسیاره خواهد داشت. آیا می‌توانید توضیح دهید چرا انسان حالت سقوط آزاد را مانند حالت بی‌وزنی واقعی احساس می‌کند ؟

۲۲ - اگرنیروی F به جرم m شتاب a بدهد :

الف) این نیرو به چه‌جرمی شتاب $10a$ خواهد داد ؟

ب) این نیرو به جرم $10m$ چه شتابی خواهد داد ؟

ج) چه نیروئی به جرم $10m$ شتاب $10a$ خواهد داد ؟

۲۳ - قانون‌سوم نیوتن‌را به‌طورساده و واضح‌آن‌طورکه خود استنباط کرده‌اید بیان‌کنید.

۲۴ - با توجه به‌قانون سوم نیوتن ، درمثالهای زیر نیروهای مؤثررا مشخص‌کنید :

الف) اسبی که یك‌گاری را برسطح افقی باشتاب می‌کشد .

ب) شناگری که باسرعت ثابت درآب شنا می‌کند .

۲۵ ـ یك طناب در اثر نیروی کشش بزرگتر از ۵۰۰ نیوتن پاره می‌شود . اگر دونفر دوسر این طناب را بگیرند وهریك بانیروی ۳۰۰ نیوتن درجهت مخالف دیگری بکشدآیاطناب پاره می‌شود ؟ پاسخ خود را با دلیل بیان‌کنید .

۲۶ ـ درنظربگیرید که در یك مسابقه زورآزمایی دوپسربچه به جرمهای مساوی ، یکی کوتاه ولی عضلانی و ورزشکار و دیگری بلند ولاغر روی دو چهارچرخه به جرمهای مساوی روی سطح افقی که اصطکاك آن ناچیز است بەفاصلهٔ معین ازیکدیگر ایستاده‌اند و دو سرطنابی را در دست دارند . خط پایان مسابقه درست در وسط فاصلهٔ دوچهارچرخه است ، هـرگاه این دوپسر شروع به‌کشیدن طناب‌کنند .

۱ـ هردو چهارچرخه باهم به‌خط پایان مسابقه‌می‌رسند .

۲ـ چهارچرخهٔ پسر ورزشکار زودتر به‌خط پایان مسابقه می‌رسد .

۳ـ چهارچرخهٔ پسر لاغر زودتر به‌خط پایان مسابقه می‌رسد .

۴ـ چهار چرخه‌ها ازجای خود حرکت نمی‌کنند. جواب درست را با بیان دلیل معین‌کنید.

۲۷ـ طبق قانون عمل و عکس‌العمل، نیرویی کـه اسب برمالبندگاری وارد می‌کند برابر نیرویی است‌که‌گاری براسب وارد می‌سازد. پس چگونه اسب‌گاری را می‌کشد؟

این مساله‌ها را حل‌کنید

توجه به‌نکات زیر شمارا درحل مسائل دینامیك راهنمایی وکمك می‌کند :

۱) شکل ساده‌ای از موضوع مساله رسم‌کنید .

۲) هرشیئی راکه موردنظرشما است جداگانه درنظربگیرید و نیروهائی راکه برآن وارد می‌شوند با بردارهائی‌که طولشان متناسب با نیروهاست نمایش دهید .

بدیهی است اگر بریك نقطه ازشیئی چند نیرو اثرکند ، نیروی مؤثری کـه بەآن شتاب می‌دهد برآیند این‌نیروهاست . براساس ترکیب نیروها(که درکتاب فیزیك سال اول آموخته‌اید و در بخش ۴ این‌کتاب نیز اشاره‌ای به‌آن شده است) نیروی برآیند را معین‌کنید .

۳) با استفاده ازقانون دوم نیوتن ، برآیند نیروها را برابر ma بگیرید .

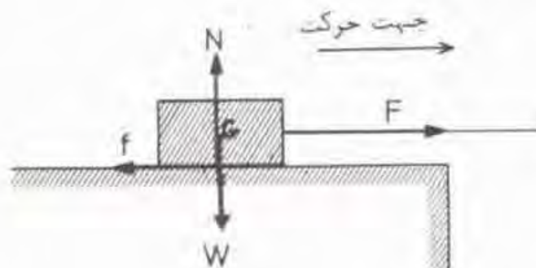
۴) معادلهٔ حاصل را حل‌کنید وکمیت مجهول را به‌دست آورید .

۵) مقادیر عددی داده شده را با قید واحدهای آنها به‌جای کمیتهای معلوم بگذاریـد و جواب مساله را به‌دست‌آورید .

نمونه‌کاربرد این‌نکات را درمثالهایی‌که در این بخش‌آورده‌ایم دیدید . دراین‌جا نیزبه‌حل

دومثال دیگر می‌پردازیم وحل بقیه را به‌عهدهٔ خود شما می‌گذاریم .

مثال ۱ – نیروسنجی را به‌قطعه چوبی به جرم $۲/۰ \, kg$ متصل کرده و آن را در راستای افقی برسطح میزی می‌کشیم وقتی‌که قطعه چوب با هرتندی ثابتی کشیده می‌شود نیروسنج نیروی ثابت ۰/۴۰ نیوتن را نشان می‌دهد . در آزمایش دیگر قطعه چوب را با شتاب ثابت می‌کشیم بطوری‌که نیروسنج ۲/۱ نیوتن را نشان دهد . شتاب حرکت را دراین حالت حساب‌کنید (جرم نیروسنج دربرابر جرم قطعه چوب ناچیز است).



شکل ۳-۱۶

حل – وقتی‌که قطعه چوب روی سطح میز با تندی ثابت‌کشیده می‌شود ونیروسنج نیروی ثابتی را نشان می‌دهد معنایش این است‌کــه سطح میزدارای اصطکاك است و انـدازهٔ نیروی اصطکاك‌که همواره در خلاف جهت حرکت است برابر نیروی‌کشش است . این نیرو را درشکل (۳-۱۶) به f نشان داده‌ایم . نیروهای دیگری‌که برجسم وارد می‌شوند عبارتند از : وزن‌جسم (w) وعکس‌العمل سطح‌میز (N) ونیروی کشش (F) که روی نیروسنج خوانده می‌شود . این نیروها را به طوری‌که درشکل دیده می‌شود بابردارهائی به‌طول مناسب نمایش داده‌ایم . w ، وزن جسم ، نقشی در حرکت‌آن ندارد زیرا برراستای حرکت عمود است وبا N ، عکس‌العمل سطح ، خنثی می‌شود . بنابراین نیروهای مؤثر در حرکت جسم عبارتند از F (نیروی‌کشش) و f (نیروی اصطکاك) که در خلاف جهت یکدیگر برجسم اثر می‌کنند و برآیند آنها $F - f$ است وطبق قانون دوم نیوتن خواهیم داشت :

$$F - f = ma$$

به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود :

– ابتدا شکل ساده‌ای ازموضوع مورد بحث مساله را رسم‌کردیم .

– نیروهای وارد برشیئی موردنظر را با بردارهائی به‌طول مناسب نشان دادیم .

– طبق قانون دوم نیوتن برآیند نیروها را برابر ma قراردادیم .

– اینك شرایط مساله را به‌کار می‌بریم وجواب را معین می‌کنیم :

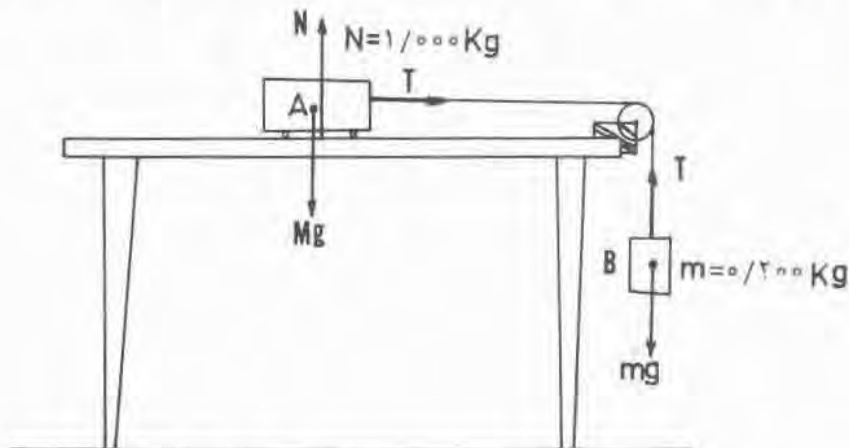
وقتی‌که تندی ثابت است شتاب صفر است ، پس $F-f=0$ بنابراین

$$f=F=0/40N$$

و هنگامی‌که نیروی کشش $F=2/1N$ است شتاب حرکت برابراست با :

$$a=\frac{F-f}{m}=\frac{2/10^N-0/4^N}{2/0kg}=\frac{1/7^N}{2/0kg}=0/85\frac{N}{kg}\left(\frac{m}{s^2}\right)$$

مثال۲ـ وزنهٔ A به‌جرم $M=1/000kg$ روی سطح افقی میزی‌که اصطکاك آن ناچیز است قرار گرفته و نخی‌که از شیار قرقره‌ای می‌گذرد آن را به وزنهٔ آویزان B به جرم $m=0/200\ kg$ وصل می‌کند . (شکل۳ـ۱۷) راستای نخ با سطح میز موازی است وجرم نخ و قرقره و اصطکاك آن ناچیز است . شتاب حرکت دستگاه وکشش نخ را حساب کنید .



شکل ۳ـ۱۷ـ نیروهای وارد بر هرجسم را با بردارهایی به‌طول مناسب نمایش می‌دهیم .

حل ـ وزنهٔ آویزان B دراثر نیروی وزن خود یعنی mg ، به‌طرف پائین‌کشیده می‌شود و نیروی کشش نخ که آن را به T نمایش داده‌ایم ، مانع سقوط آزاد آن می‌گردد. بنابراین نیروی مؤثری‌که به‌آن شتاب می‌دهد $mg-T$ است واگرشتاب حرکت دستگاه‌را به a نشان دهیم برای وزنهٔ B داریم :

$$mg-T=ma$$

$$T=mg-ma \qquad (۱۷\text{–}۳)$$

نیروی مؤثر بر وزنهٔ A که روی میز افقی‌کشیده می‌شود فقط T (کشش نخ) است ، زیرا وزن‌آن (Mg) بانیروی عکس‌العمل سطح (که آن را به N نمایش داده‌ایم وبرسطح عمود است) خنثی می‌شود واصطکاك هم‌که ناچیز است ، بنابراین :

$$T=Ma \qquad (۱۸\text{–}۳)$$

ازترکیب دومعادلهٔ (۳-۱۷) و (۳-۱۸) نتیجه می‌شود :

$$\begin{cases} a=\dfrac{m}{M+m}\,g \\ T=\dfrac{Mm}{M+m}\,g \end{cases} \qquad (۱۹-۳)$$

به ازای $M=1/000\,kg$ و $m=0/200\,kg$ و $g=9/80\frac{m}{s^2}$:

$$a=\frac{0/200\,kg}{1/000\,kg+0/200\,kg}\times 9/80\frac{m}{s^2}=\frac{0/200}{1/200}\times 9/80\frac{m}{s^2}\simeq 1/63\frac{m}{s^2}$$

$$T=\frac{1/000\,kg\times 0/200\,kg}{1/000\,kg+0/200\,kg}\times 9/80\frac{m}{s^2}=\frac{0/200}{1/200}kg\times 9/80\frac{m}{s^2}\simeq 1/63\,N$$

۱) - می‌خواهیم به‌جسمی که جرمش $70/0\,kg$ است شتابی برابر $4/50\,\frac{m}{s^2}$ بدهیم ، نیروی لازم را در دوحالت زیر حساب‌کنید :

الف) جسم درسطح افقی‌که اصطکاك آن ناچیز است حرکت می کند .

ب) جسم در راستای قائم ازپائین به‌بالا حرکت می‌کند .

جواب : الف) $315N$ ب) $1001N$

۲) - یك توپ بازی گلف که جرمش ۲۵ گرم است با سرعت ثابت $40/0\frac{m}{s}$ به توده‌ای گل برخوردکرده و $8/0\,cm$ درآن فرو می‌رود. اگرحرکت این‌توپ درون تودهٔ گل‌درامتداد خط راست وباشتاب ثابت صورت گرفته باشد و سنگینی توپ دراین حرکت نقشی نداشته باشد مطلوبست :

الف) مدت حرکت توپ در تودهٔ گل .

ب) نیروی متوسط وارد برتوپ درون تودهٔ گل .

پ) میزان تغییر اندازه حرکت توپ .

جواب : الف) $4\times 10^{-3}s$ ب) $250N$ پ) $1kg\,.\,\frac{m}{s}$

۳) - اتومبیلی‌که با راننده‌اش $2000kg$ جرم دارد ازحال سکون به‌حرکت درمی‌آید و پس از $12/0$ ثانیه سرعتش به $90/0\,\frac{km}{h}$ می‌رسد . اگرشتاب حرکت این‌اتومبیل ثابت فرض شود مطلوبست :

الف) اندازهٔ این شتاب .

ب) نیروی متوسط مؤثر وارد بر اتومبیل دراین مدت .

جواب : الف) $\simeq 2/1\frac{m}{s^2}$ ب) $4166N$

۴) ـ دوبارکش یکی خالی به‌جرم m و دیگری پراز بار به‌جرم m' تحت تأثیرنیروهای کشش مساوی روی یك جاده افقی با هم شروع به‌حرکت می‌کنند . اگـر پس‌ازگذشت زمان t سرعت آن‌ها به‌ترتیب v' و v باشد نسبت $\frac{v}{v'}$ برابر خواهد بود با :

$$\frac{m'}{m}-۱ \qquad \frac{m}{m'}-۲ \qquad \sqrt{\frac{m'}{m}}-۳ \qquad \sqrt{\frac{m}{m'}}-۴$$

جواب درست را با محاسبه پیداکنید .

۵) ـ جرم یك هـواپیمای مسافربر جت بـا مسافرانش $۱/۲۵۰ \times ۱۰^{۵}kg$ است . این هواپیما از ابتدای باند پرواز شروع به‌حرکت می‌کند وپس‌از پیمودن ۲۰۰۰/۰ متر روی باند با سرعت $۶۰/۰\frac{m}{s}$ از زمین بلند می‌شود. اگرشتاب حرکت هواپیما روی باند پروازثابت‌باشد:

الف) این شتاب را حساب‌کنید .

ب) ازلحظهٔ شروع حرکت ، چه مدت طول می‌کشد تا هواپیما باند پرواز را ترك‌کند ؟

پ) نیروی مؤثر متوسط وارد برهواپیما دراین مدت چند نیوتن است ؟

ت) تغییر اندازه حرکت هواپیما دراین مدت چه اندازه است ؟

جواب: الف) $۰/۹۰\frac{m}{s^{۲}}$ ب) $۶۶/۷s$ پ) $۱/۱۲۵ \times ۱۰^{۵}N$ ت) $۷/۵۰ \times ۱۰^{۶}kg\frac{m}{s}$

۶) ـ کامیونی به جرم $۱۰ \times ۱۰^{۳}\ kg$ (۱۰ تن) که ایستاده است به‌حرکت درمی‌آید و پس‌از ۱۵ ثـانیه در جادهٔ راست و افقی با شتاب ثابت سرعتش به $۲۰\frac{m}{s}$ می‌رسد ، مطلوبست :

الف) شتاب حرکت ونیروی مؤثر متوسط وارد برکامیون دراین مدت .

ب) تغییر اندازهٔ حرکت کامیون در این مدت .

۷) ـ اتومبیلی‌که با مسافرانش $۲۰۰۰kg$ جرم دارد ازحال سکون به‌حرکت درمی‌آید و در خیابان افقی مدت ۱۶ ثانیه باشتاب $۲/۲۰\frac{m}{s^{۲}}$ حرکت می‌کند .

الف) سرعت اتومبیل را درپایان ثانیه شانزدهم حساب‌کنید .

ب) چه نیروئی به‌اتومبیل این شتاب را می‌دهد . نیروئی‌که اتومبیل را به‌جلو می‌راند به‌کجا اثر می‌کند ؟

۸) ـ برای کوبیدن میخهای بزرگ به تخته‌های زیر ریل راه‌آهـن (جهت اتصال ریل به تخته‌ها) ازچکشی‌که جرم وزنه آن $۳/۰kg$ است استفاده می‌شود . هرگاه چکش با سرعت $۵/۰\frac{m}{s}$ به‌میخ‌برخوردکند و دراثرضربهٔ برخورد ، میخ $۱/۰cm$ درتخته فرورود مطلوبست:

الف) شتاب‌کند شدن حرکت چکش (یا شتاب فرورفتن میخ در تخته) .

ب) زمان برخورد .

پ) اندازهٔ ضربهٔ وارد برمیخ .

جواب : الف) $1/25\times 10^{3}\frac{m}{s^2}$ ب) $4/0\times 10^{-3}s$ پ) $15kg\frac{m}{s}$

۹) ــ اتومبیلی به‌جرم کل $1500kg$ ازحال سکون به‌حرکت درمی‌آید وابتدا درمدت ۰/۸ثانیه باشتاب‌ثابت $2/5\frac{m}{s^2}$ وبعددرمدت ۱۰/۰ثانیه باشتاب ثابت $1/5\frac{m}{s^2}$حرکت‌می‌کند.

الف) نیروهای مؤثر براتومبیل را درهریك‌ازاین دومرحله حساب‌کنید .

ب) اتومبیل چه‌مسافتی دراین‌مدت ۱۸ ثانیه می‌پیماید .

جواب : الف) $3/75\times 10^{3}N$ و $2/25\times 10^{3}N$ ب) $355m$

۱۰) ــ جرم‌آسانسوری با بار درون‌آن $1500\ kg$ است . نیروی‌کشش‌کابل‌این آسانسور را در حالات زیر محاسبه‌کنید .

الف) آسانسور ساکن است .

ب) آسانسور با شتاب ثابت $0/60\frac{m}{s^2}$ به‌طرف بالا حرکت می‌کند .

پ) آسانسور باهمین شتاب ثابت به طرف پایین حرکت می‌کند .

جواب : الف) $1/47\times 10^{4}N$ ب) $1/56\times 10^{4}N$ پ) $1/38\times 10^{4}N$

۱۱) ــ اگر شخصی به‌جرم $70kg$ درون آسانسور مسألهٔ ۱۰ روی باسکولی ایستاده باشد ، باسکول وزن اورا درهریك ازحالات سه‌گانه چند نیوتن نشان می‌دهد .

جواب : الف) $686N$ ب) $728N$ پ) $644N$

۱۲) ــ درسال ۱۹۶۶ میلادی یك‌آزمایش نمایشی براساس قانون‌دوم نیوتن درفضا انجام شد . منظور از این‌آزمایش تعیین جرم بدنهٔ یك راکت بنام آجنا [1] بودکه درمداری به‌دور زمین حرکت می‌کرد ، و این‌کار به‌وسیلهٔ شتاب دادن به‌آن در اثر ضربه به‌یك سفینهٔ فضایی بنام جمینی[2] انجام‌گرفت (جرم آجنا در واقع‌ازپیش معلوم بود ولی این‌آزمایش به‌منظور بسط روشی برای تعیین جرم یك ماهوارهٔ ناشناس طرح ریزی شد) پس‌ازآن‌که سفینهٔ فضایی جمینی بابدنهٔ راکت آجنا تماس حاصل‌کرد ضربهٔ تحمیل شده برجمینی درمدت ۰/۷ ثانیه اندازه‌گیری شد و نیروی ضربه‌ای متوسطی ، برابر ۸۹۰ نیوتن به‌دست آمد . تغییر تندی مجموعهٔ سفینه و راکت در این مدت $0/93\frac{m}{s}$ و جرم سفینهٔ جمینی درحدود $3400\ kg$ بود . به‌کمك این‌معلومات‌جرم

۱- Agena

۲- Gemini برای اطلاع بیشتر دربارهٔ این وسائل فضائی به‌کتاب «کیهان‌نوردی دراعماق فضا» تألیف و ترجمهٔ سرهنگ منصور شفازند که در سال ۱۳۴۸ به چاپ رسیده است مراجعه‌کنید .

بدنهٔ راکت آجنا را حساب کنید و آن‌چه را که از راه محاسبه به دست می‌آورید باجرم واقعی آن‌که تقریباً ۳۶۶۰ کیلوگرم بوده است مقایسه کنید ومیزان درصد خطای نسبی

(یعنی $\frac{\text{جرم اندازه گرفته شده} - \text{جرم واقعی}}{\text{جرم واقعی}} \times ۱۰۰$) را به‌دست آورید .

جواب : الف) $۳۳۰۰ \ kg$ ب) تقریباً ۱۰٪

۱۳) ـ می‌دانید وقتی که دونده‌ای می‌دود باکف پای خود زمین را به‌عقب می‌راند زمین هم بنابه‌قانون سوم نیوتن نیروئی مساوی و درخلاف جهت بر دونده وارد می‌سازد و اورابه‌جلو می‌راند واین همان نیروئی است که دونده در اثرآن می‌تواند شتاب بگیرد . نیروئی هم‌که دونده برزمین وارد می‌کند ، طبق‌قانون دوم نیوتن باید قاعدتاً به‌زمین شتاب بدهد ولی چون جرم زمین دربرابر جرم دونده بسیار بزرگ است شتاب آن دراثر این نیرو بسیارکم ونامحسوس است . درنظربگیرید که جرم دونده‌ای ۶۰کیلوگرم است وباشتاب $۵\frac{m}{s^۲}$ شروع به‌دویدن می‌کند. جرم زمین درحدود $۶ \times ۱۰^{۲۴} kg$ است .

الف) چه‌شتابی دونده به زمین می‌دهد ؟

ب) اگر مدت شتاب‌گرفتن دونده ۲ ثانیه باشد سرعت دونده درپایان این مدت‌چیست؟ سرعت عقب رانده شدن زمین درپایان این مدت چه‌اندازه است ؟

جواب : الف) $۵ \times ۱۰^{-۲۳}\frac{m}{s^۲}$ ب) $۱۰\frac{m}{s}$ و $۱۰^{-۲۲}\frac{m}{s}$

۱۴ـ بسته‌ای به جرم $۲۰kg$ روی‌کف چهارچرخه‌ای به جرم $۶۰ \ kg$ گذارده شده است وچهارچرخه روی سطح افقی‌که اصطکاك آن ناچیز است قرار دارد . نیروی افقی بیش از ۸۰ نیوتن لازم است تا بسته برکف چهارچرخه بلغزد .

بیشترین نیروی افقی‌که می‌توان برچهارچرخه واردکرد تا بدون لغزیدن بسته حرکت کند چند نیوتن است ؟

جواب : $۳۲۰N$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۳

۳ـ۱) زیرا به‌هنگام توقف ناگهانی اتومبیل دراثر ترمز یاضربه ،کمربند مانع پرتشدن سرنشین به‌جلو می‌شود .

۳ـ۲) نیروئی‌که اتومبیل‌را مجبور به تبعیت ازپیچ جاده می‌کنداصطکاك بین لاستیك‌های چرخ اتومبیل وسطح جاده است . وقتی‌که سطح جاده یخبندان باشد اصطکاك خیلی‌کم است و

اتومبیل نمی‌تواند ازپیچ جاده تبعیت کند وطبق قانون ماند به‌راستای حرکت خود ادامه‌می‌دهد و ازجاده خارج می‌شود .

۳-۳) نه ، زیرا نیروئی وجود ندارد که مانع حرکت شود .

۳-۴) مستقیماً نه ، زیرا نیروی وزن برراستای حرکت عموداست و با عکس‌العمل‌سطح خنثی می‌شود . بدیهی است به‌طور غیرمستقیم در نیروی اصطکاك مؤثر است .

۳-۵) اندازهٔ این نیرو برحسب نیوتن برابر است با :

$$۱۰^{-۳}\text{kg} \times ۱۰^{-۲}\frac{\text{m}}{\text{s}^۲} = ۱۰^{-۵}\text{N}$$

نیروئی‌که به جرم یك‌گرم شتاب یك سانتیمتر بر‌مجذور ثانیه می‌دهد معادل $۱۰^{-۵}$ نیوتن است‌که دردستگاه واحدهای قدیمی بنام دستگاه سانتیمتر ـ گرم ـ ثانیه (یا به‌اختصار .C.G.S) دین (dyne) نامیده شده است .

بنابراین :

$$۱\ \text{dyne} = ۱۰^{-۵}\text{N}$$

۳-۶) $\text{MLT}^{-۲}$

۳-۷) در اثر ضربه ; یعنی وقتی به‌آنها ضربه‌ای وارد شود شتاب می‌گیرند .

۳-۸) $P = mv = ۱۲/۰ \times ۱۰^{-۳}\text{kg} \times ۴۰۰/۰\frac{\text{m}}{\text{s}^۲} = ۴/۸۰\text{kg} . \frac{\text{m}}{\text{s}}$

۳-۹) با واردکردن نیرو توسط یك ماشین منگنه یا در صورت امکان باقرار دادن وزنه روی میخ به طوری‌که میخ درتخته شروع به‌فرورفتن کند .

۳-۱۰) عمل‌یعنی نیروئی‌که جسم اول برجسم‌دوم واردمی‌کند وعکس‌العمل یعنی‌نیروئی که جسم دوم برجسم اول وارد می‌سازد .

۳-۱۱) مرکزکرهٔ زمین . درمحاسبهٔ این نیرو ، نیوتن زمین را درحکم کرهٔ همگنی گرفته است‌که تمام جرم آن درمرکزش متمرکزباشد (یعنی درحکم یك ذره ونظر نیوتن را دراین‌باره در بخشهای بعد خواهیم دید) .

۴

بردار و ترکیب کمیتهای برداری

میدانیم کمیتهای فیزیکی به‌دو دسته اسکالر و برداری تقسیم می‌شوند . وقتی‌که ما با دو یا چند کمیت اسکالر مانند جرم و زمان و دما ومساحت وحجم سروکار داریم برای ترکیب‌آنها ازچهار عمل اصلی یعنی جمع وتفریق و ضرب و تقسیم استفاده می‌کنیم . ترکیب کمیتهای اسکالر مسأله خاصی را به‌وجود نمی‌آورد زیـرا این‌کمیتها بدون راستا و سو هستند و تنها با اندازه‌شان مشخص مـی‌شوند ، بنابراین به‌هنگام ترکیب آنها ، فقط باید توجه داشت‌که‌هم‌جنس و هم‌واحد باشند.

کمیتهای‌برداری علاوه بر اندازه دارای جهت نیزهستند وباهم طبق قاعده‌های ریاضی ویژه‌ای ترکیب می‌شوند که آشنائی با این قواعد حل مسأله ترکیب این نوع کمیتها را آسان می‌کند . شما تا کنون باتعدادی ازاین‌گونه‌کمیتها مانندجابجائی ، نیرو ،گشتاورنیرو ، تندی ، اندازه حرکت ، شتاب ، میدان الکتریکی ومیدان مغناطیسی آشنا شده‌اید ، علاوه براین درکتاب فیزیك سال اول ترکیب‌نیروها راکه خود جمع برداری است دیده‌اید . دراین‌بخش باتفصیل‌بیشتری که جنبهٔ ریاضی پیشرفته‌تری دارد جمع وتفریق این‌کمیتها را دنبال خواهیدکرد و دربخشهای بعد هرجاکه لازم باشد با روش‌ضرب‌آنها نیز آشنا خواهید شد .

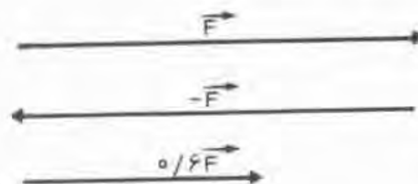
بردار وعلامت‌گذاری برداری ـ بردار[1] ، بطوری که می‌دانید ، معرف‌کمیتی است‌که دارای جهت و بزرگی‌است وبه‌صورت قطعه خط جهت داری‌نمایش داده می‌شودکه طولش متناسب با اندازه‌کمیت‌مورد

۱ـ این‌لغت درزبان‌فارسی معادل‌کلمهٔ لاتین «Vector» است‌که دراصل به‌معنای یك خط راست موهومی واصل بین یك‌ستاره وکانون بیضی مسیر حرکت آن بوده واین‌تعریف امروزه منسوخ شده است .

نظر است و با یك مقیاس اختیاری سنجیده می‌شود .

کمیتهای برداری را به صورتهای مختلف علامت گذاری می کنند . علامت گذاری که ما بکار می‌بریم این است که کمیت برداری‌را به‌یکی از حروف (معمولا حرف اول نام لاتینی آن کمیت) نمایش می‌دهیم و بالای این حرف یك علامت پیکان کوچك می گذاریم [1] مثلا نیروی $\vec{F}$ ، تندی $\vec{V}$ ، شتاب $\vec{a}$. اگر همین حرف بدون علامت پیکان نوشته شود معرف بزرگی یا اندازه کمیت است . مثلا بردار $\vec{F}$ دارای بزرگی F است .

اندازه حرکت $m\vec{V}$ یك کمیت برداری است که بزرگی آن m برابر بردار $\vec{V}$ است ومی‌دانیدکه m یك کمیت اسکالر است . این نشان می‌دهدکه می‌توان یك بردار را دریك کمیت اسکالر ضرب کرد . حاصل ضرب یك بردار دریك کمیت اسکالر بازهم یك بردار است که بسته به‌مقدار یا علامت کمیت اسکالر ممکن است بزرگتر یا کوچکتر ، هم سو و یا درسوی مخالف بردار اصلی باشد . در شکل ۴-۱ یك بردار $\vec{F}$ و یك بردار $-\vec{F}$ که بزرگی آن برابر بزرگی $\vec{F}$ ولی درسوی مخالف آن است و یك بردار که بزرگی آن ۰/۶F است نشان داده شده است .



شکل ۴-۱-
نمایش هندسی بردارهای $\vec{F}$ و $-\vec{F}$ و $0/6\vec{F}$

پرسش ۴-۱ - درچه صورت دو بردار باهم برابرند ؟

جمع برداری - روش جمع کردن بردارها را نخست با مثالی که شامل دو جابجائی است نشان می‌دهیم : درنظر بگیریم یك کشتی در دریا از نقطه‌ای که آن‌را درشکل ۴-۲ به A نمایش داده‌ایم شروع به‌حرکت کند و ۸ کیلومتر به‌سوی شمال تا نقطه B پیش برود سپس در این نقطه تغییر جهت دهد و ۶



شکل ۴-۲- نموداری که روش جمع کردن دو بردار جابجائی را نشان می‌دهد

۱- بعضی یك خط موج‌دار زیر حرف نمایش کمیت مورد نظر می گذارند مانند $\underset{\sim}{F}$ و درمتن بعضی از کتابها کمیتهای برداری باحروف درشت و اندازه آنها باحروف کج (حروف ایرانیك) نمایش داده شده است.

کیلومتر دیگر به‌سمت مشرق حرکت‌کند و به‌نقطه C برسد . در این مثال کشتی روی هم مسافت ۱۴=۶+۸ کیلومتر را پیموده است ولی فاصله دونقطه A و C یا به‌عبارت دیگر ، اندازه جابجائی کشتی ۱۴ کیلومتر نیست . برای تعیین اندازه جابجائی کشتی ، بردار $\overrightarrow{AB}$ را با مقیاس مناسبی ، مطابق شکل ، روی صفحه کاغذ رسم‌می‌کنیم. مثلا اگرهرسانتیمتر نمایش یك‌کیلومتر باشد طول‌این‌بردار ۸cm است . سپس از نقطه B بردار $\overrightarrow{BC}$ را عمود برآن به‌طول ۶cm می‌کشیم. نقطه A را به C وصل می‌کنیم ، طول بردار $\overrightarrow{AC}$ را بر حسب سانتیمتر اندازه می‌گیریم‌این‌طول اندازه واقعی جابجائی کشتی رانشان می‌دهد . دراین‌مثال طول بردار $\overrightarrow{AC}$ برابر ۱۰cm است و به‌این معنی است‌که‌کشتی نسبت به مبدأ A به‌اندازه ۱۰km جابجا شده‌است . ازلحاظ برداری ، $\overrightarrow{AC}$ حاصل جمع برداری ، یا برآیند دو بردار $\overrightarrow{AB}$ و $\overrightarrow{BC}$ است واین جمع برداری راچنین نمایش می‌دهیم .

$$\overrightarrow{AC}=\overrightarrow{AB}+\overrightarrow{BC} \quad (۱-۴)$$

و یا

$$\overrightarrow{R}=\overrightarrow{a}+\overrightarrow{b}$$

بدیهی‌است R و a و b به‌ترتیب اندازه‌های سه بردار $\overrightarrow{AC}$ و $\overrightarrow{AB}$ و $\overrightarrow{BC}$ هستند .

دراین مثال زاویه A تقریباً °۳۷ است که با نقاله می‌توان آن‌را اندازه‌گرفت . بنابراین راستای بردار $\overrightarrow{R}$ به اندازه °۳۷ از راستای شمال به سمت شرق منحرف است .

اندازه R را دراین مثال می‌توانیم طبق‌قضیه فیثاغورس از مثلث قائم‌الزاویه ABC نیز به دست آوریم :

$$R^۲=a^۲+b^۲ \quad (۲-۴)$$

یا

$$R^۲=(۸km)^۲+(۶km)^۲=۱۰۰(km)^۲$$

و

$$R=۱۰km$$

مثالی دیگر ـ سرعت سنج یك هواپیما نشان می‌دهدکه هواپیما با سرعت ۴۵۰ کیلومتر برساعت حرکت می‌کند و دستگاه جهت‌یاب جهت حرکت را به‌سمت مشرق نشان می‌دهد ولی باد با تندی ۵۰ کیلومتربرساعت ازشمال به‌جنوب می‌وزد . هواپیما درچه‌جهتی باید سمت بگیرد تا جهت حرکت آن به طرف مشرق باشد و اندازه تندی ظاهری آن نسبت به‌ناظری‌که در سطح زمین است چیست ؟

ـ هواپیما باید طوری سمت بگیردکه مقداری از نیروی موتور آن صرف خنثی‌کردن اثر وزش باد شود تابتواند درست به طرف مشرق پیش‌برود. بنابراین تندی ظاهری حرکت هواپیما به‌طرف‌مشرق (که‌آن‌را به $\overrightarrow{V_A}$ نمایش‌می‌دهیم) برآیند تندی واقعی هواپیما ($\overrightarrow{V_P}$) وتندی‌وزش باد($\overrightarrow{V_B}$) است (شکل



شکل ۴-۳- هواپیما باید طوری سمت بگیرد تا نیروی موتور اثروزش باد را خنثی‌کند

۳-۴) یعنی :

$$\vec{V_A} = \vec{V_P} + \vec{V_B}$$

ازشکل ۴-۳ نتیجه می‌شود :

$$\sin\alpha = \frac{V_B}{V_P} = \frac{۵۰}{۴۵۰} \simeq ۰/۱۱۱$$

و

$$\alpha \simeq ۶/۳^{\circ}$$

یعنی هواپیما باید تقریباً به اندازهٔ زاویه ۶/۳ ازراستای مشرق به‌طرف شمال سمت بگیرد.

اندازهٔ V_A طبق قضیه فیثاغورس ازرابطهٔ زیرحساب می‌شود :

$$V_A^{۲} = V_P^{۲} - V_B^{۲} = \left(۴۵۰\frac{km}{h}\right)^{۲} - \left(۵۰\frac{km}{h}\right)^{۲} = ۲۰۰۰۰۰\left(\frac{km}{h}\right)^{۲}$$

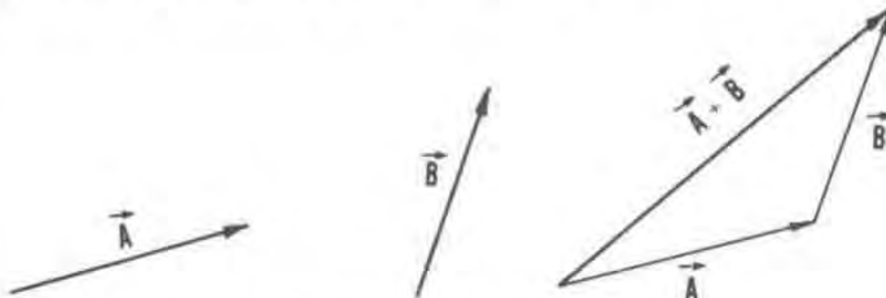
و

$$V_A = \sqrt{۲۰۰۰۰۰} \simeq ۴۴۸\frac{km}{h}$$

قاعده کلی برای جمع‌برداری ـ بـرای جمع دو بردار ، یا به‌عبارت دیگربرای تعیین برآیند دو بردار دو روش متداول است یکـی روش مثلث و دیگری روش متوازی‌الاضلاع .

الف ـ روش‌مثلث ـ درشکلهای ۴-۱و۴-۲ بـرای تعیین برآیند دوبردار از روش مثلث استفاده شده است . به‌طور کلی اگـر منظور تعیین مجموع (یابرآیند) دو بردار $\vec{A}$ و $\vec{B}$ باشد بردار $\vec{B}$ را به موازات خود آن‌قدر جابجا می‌کنیم تا مبدأ آن بر انتهای بردار $\vec{A}$ منطبق شود . برداری‌که بین مبدأ $\vec{A}$ و انتهای $\vec{B}$ رسم می‌شود (شکل۴-۴) مجموع یا برآیند دوبردار $\vec{A}$ و $\vec{B}$ است . بدیهی است در صورتی بردارها در یك راستا نباشند اندازه بردار برآیندکوچکتراز مجموع اندازه‌های دوبردار است .

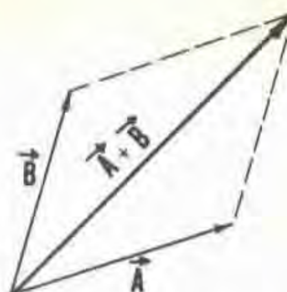
ب ـ روش متوازی‌الاضلاع[۱] ـ بـرای تعیین مجموع دو بردار $\vec{A}$ و $\vec{B}$ به‌روش متوازی‌الاضلاع بردار $\vec{B}$ رابه‌موازات خودآن‌قدر جابجا می‌کنیم تا مبدأ آن برمبدأ بردار $\vec{A}$ منطبق شود (به‌عبارت دیگرازمبدأ بردار $\vec{A}$ برداری مساوی و موازی و هم‌سوی بردار $\vec{B}$ رسم می‌کنیم[۲]) سپس روی این



شکل ۴-۴ ـ تعیین برآیند دو بردار به‌روش مثلث

۱ـ با این روش درکتاب فیزیك سال اول ضمن مطالعه ترکیب نیروها آشنـا شده‌اید . روش مثلث ساده‌تر و روش متوازی‌الاضلاع متداولتر است .

۲ـ برداری‌که ازیك نقطه مساوی وموازی وهمسو با یك بردار رسم می‌شود بردار همسنگ نیز نـامیده می‌شود .



شکل ۴-۵- استفاده از روش متوازی‌الاضلاع برای تعیین برآیند دو بردار

دوبردار که ازیك نقطه رسم شده‌اند متوازی‌الاضلاعی بنا می‌کنیم (شکل ۴-۵) قطراین متوازی‌الاضلاع مجموع برداری $\vec{A}+\vec{B}$ است .

پرسش ۴-۲ - آیا ترتیب بردارها در حاصل جمع برداری مؤثر است ؟

تفریق بردارها - تفریق دوبردار حالت خاصی از جمع دو بردار است . مثلا برای تفریق بردار $\vec{B}$ از بردار $\vec{A}$ کافی است‌که بردار $\vec{A}$ را با بردار $\vec{B}$ - که اندازه آن مساوی با اندازه بردار $\vec{B}$ ولی در خلاف جهت‌آن است جمع‌کنیم (شکل۴-۶) یعنی :

$$\vec{A}-\vec{B}=\vec{A}+(-\vec{B}) \qquad (۴-۳)$$

نیروها به طریق برداری با هم جمع می‌شوند - گفتیم نیرو کمیت برداری است زیرا هم‌دارای‌بزرگی وهم دارای جهت است . بنابراین بـرای ترکیب نیروها باید دستورهای جمع برداری را بکاربرد.

پرسش۴-۳- چرا وزن‌یك‌کمیت برداری‌است؟

مثال - قایقی درون یك‌کانال توسط دوطناب که راستاهای آنها با هم زاویه $\alpha=۶۰°$ می‌سازند ازدو کناره کانال با نیروهای ۴۰۰N و۶۰۰N برروی آب‌کشیده می‌شود . اندازه برآیند این نیرو راحساب کنید . اگر نیروی برآیند موازی باکناره کانال باشد (شکل۴-۷)هریك ازطنابها باکناره‌کانال چه‌زاویه‌ای می‌سازد ؟

- روش مثلث‌را برای پیداکردن جوابها بکار می‌بریم . اگر هرسانتیمتر نمایش ۱۰۰N نیوتن‌باشد طول بردارهـای $\vec{F_1}$ و $\vec{F_2}$ به‌ترتیب ۴ cm و ۶cm است . طول برآیند $\vec{R}$ با خطکش و اندازه زاویه‌های φ و θ با نقاله معین می‌شود .

با محاسبه نیز می‌توان بزرگـی R و اندازه زاویه‌های θ و φ رابه‌دست آورد :

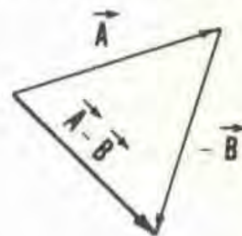
در مثلث OAB بنابه‌قانون‌کسینوسها داریم :

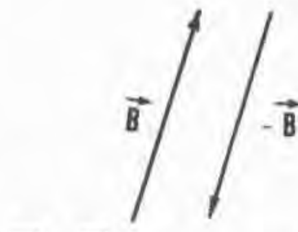
$$R^۲=F_۱^۲+F_۲^۲+۲F_۱F_۲\cos\alpha \qquad (۴-۴)$$

به ازای $F_۱=۴۰۰N$ و $F_۲=۶۰۰N$

و $\cos\alpha=\cos۶۰=۰/۵۰۰$ خواهیم داشت :

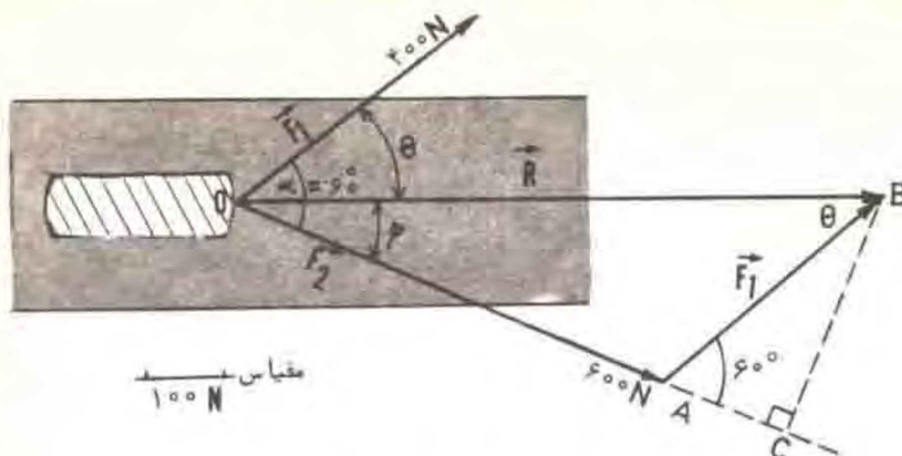
$$R^۲=۱۶۰۰۰۰+۳۶۰۰۰۰+۲\times۴۰۰\times$$
$$۶۰۰\times۰/۵۰۰=۷۶۰۰۰۰$$







شکل۴-۶- تعیین تفاضل دو بردار $\vec{A}$ و $\vec{B}$



شکل ۴-۷- استفاده از روش مثلث برای تعیین برآیند دو نیرو

و $R = ۸۷۲N$ (با سه‌رقم معنی‌دار)

• زاویه φ را کــه راستای نیروی $\vec{F_۲}$ با کنارهٔ کانال می‌سازد می‌توان از مثلث قائم‌الزاویه OCB حساب کرد:

$$\sin\varphi = \frac{BC}{R} = \frac{F_۱ \sin ۶۰°}{R}$$

$$= \frac{۴۰۰ \frac{\sqrt{۳}}{۲} N}{۸۷۲N} \simeq ۰/۳۹۷۹$$

و $$\varphi \simeq ۲۳°/۴$$

زاویه θ، که راستای نیروی $F_۱$ با کنارهٔ کانال می‌سازد بنابرقانون سینوسها از رابطهٔ زیــر حساب می‌شود:

$$\frac{\sin\theta}{F_۲} = \frac{\sin\varphi}{F_۱}$$

و یا:

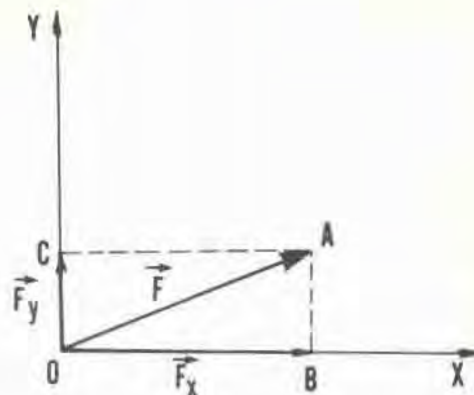
$$\sin\theta = \frac{F_۲}{F_۱}\sin\varphi = \frac{۶۰۰N}{۴۰۰N}$$

$$\times ۰/۳۹۷۹ = ۰/۵۹۶۸$$

و $$\theta \simeq ۳۶°/۶$$

پرسش ۴-۴- اگر بریک‌نقطه از جسمی بیش از دو نیرو اثر کند چگونه برآیندآنها تعیین می‌شود؟

تجزیهٔ یک‌بردار به‌دوهمنه ـ برای حل‌پــاره‌ای از مسائل گاهی لازم می‌شودکه یک بردار را به دو یا چند بردار دیگر تجزیه‌کنیم . هریک ازاین‌بردارهارا ، چنانکه می‌دانید، همنه‌یامؤلفهٔ بردار اصلی‌نامیده‌اند. شما در فیزیک سال اول ، همچنین دربخش سوم این کتاب ضمن مثالهای ماشین چمن‌زنی وتجزیه نیروی وزن یک جسم واقع برسطح شیب دار (به‌دوهمنهٔ عمود برسطح شیب‌دار وموازی با این‌سطح)باتجزیه یک‌نیرو به‌دوهمنهٔ عمود برهــم‌آشنا شده‌اید . اینک درنظربگیرید می‌خواهیم بردار $\vec{F}$ راکه مثلا نمایش یک‌نیرو است به‌دوهمنه افقی وعمودی بردو راستای ox و oy واقع دریک صفحه تجزیه کنیم (شکل ۴-۸)، برای این منظور، ازنقطه A ، انتهای‌بردار، دوخط موازی با دو محور ox و oy رسم می‌کنیم تااین‌محورها را درنقاط B و C قطع‌کند(شکل۴-۸). بردارهای $\vec{OB} = \vec{F_x}$ و $\vec{OC} = \vec{F_y}$ همنه های بردار

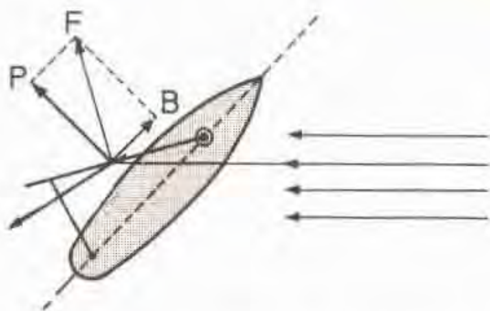


شکل ۴-۸- تجزیه یک بردار به دو همنه x و y عمود برهم

$\vec{F}$ در راستاهای عمودبرهم ox و oy خواهند بود[1]. اگرزاویه بین راستای بردار $\vec{F}$ و محور ox را به θ نمایش دهیم اندازه‌های این دوهمنه به‌آسانی ازدو رابطهٔ زیرحساب می‌شوند :

$$\begin{aligned} F_x &= F\cos\theta \\ F_y &= F\sin\theta \end{aligned} \qquad (۵-۴)$$

مثال ـ حرکت قایق بادی بر سطح آب ـ حرکت قایق بادی برسطح آب مثالی از تجزیه نیرو به‌دوهمنه عمود برهم‌است. شکل(۴-۹)نشان می‌دهد که‌بادازمشرق‌به‌مغرب‌می‌وزد ولی قایق‌باید به‌سمت شمال شرقی‌حرکت‌کند بنابراین دماغـهٔ آن متوجه شمال‌شرقی‌است ، قایق‌ران بادبان‌را در وضعی نگاه می‌دارد تا نیروی حاصل از اثروزش بادکه آن‌را به $\vec{F}$ نمایش داده‌ایم برسطح آن عمود گردد . نیروی $\vec{F}$ را می‌توانیم به دو همنه عمود بر هم $\vec{B}$ و $\vec{P}$ تجزیه‌کنیم‌همنهٔ $\vec{B}$ موازی با محور قایق است و



شکل ۴-۹- حرکت قایق بادی برسطح‌آب مثالی ازتجزیه‌نیروی $\vec{F}$ به دوهمنهٔ $\vec{B}$ و $\vec{P}$ است

سبب حرکت قایق به‌جلو می‌شود .

همنه $\vec{P}$ بر راستای حرکت قایق عمود است و سبب کج شدن و حرکت جانبی آن می‌گردد . برای‌کم‌کردن این‌دواثر، ته قایق را سنگین‌می‌سازند.

یکی ازموارد‌کاربرد تجزیه بردارها به‌دوهمنهٔ عمودبرهم x و y این است‌که به‌کمک‌آن‌می‌توانیم برآیند بردارها را آسانتر به دست‌آوریم ، زیراعمل تعیین برآیند منجربه‌پیداکردن برآیند دوبردارعمود برهم می‌شودکه در دو راستای x و y واقعند .



شکل ۴-۱۰- قایق بادی

---

[1] ـ این همنه‌ها را دراصطلاح هندسه ، تصویرهای بردار $\vec{F}$ برروی دومحور نیزمی‌نامند.

مثال- برآیند دونیرو، یکی $\vec{F}$ به‌بزرگی ۱۰۰N ودیگری $\vec{F'}$ به بزرگی ۲۰۰N را کـه بر نقطه O اثـر کرده و با محور افقی ox به ترتیب زاویه‌های ۴۵° و ۶۰° می‌سازند به‌دست‌آورید.

ـ نخست دوبردار $\vec{F}$ و $\vec{F'}$ را در دوراستای عمودبرهم ox و oy تجزیه می‌کنیم. (شکل ۴-۱۱):

$$F_x = 100\cos 45^\circ = 100\frac{\sqrt{2}}{2} \simeq 70.7N$$

$$F_y = 100\sin 45^\circ = 100\frac{\sqrt{2}}{2} \simeq 70.7N$$

$$F'_x = 200\cos 60^\circ = 200 \times \frac{1}{2} = 100N$$

$$F'_y = 200\sin 60^\circ = 200\frac{\sqrt{3}}{2} \simeq 173.2N$$

این همنه‌هارا درشکل(۴-۱۱ - ب) جداگانه نشان داده‌ایم . اینك مجموع همنه‌های x و y را حساب می‌کنیم .

$$R_x = F_x + F'_x = 70.7N + 100N = 170.7N$$

$$R_y = F_y + F'_y = 70.7N + 173.2N = 243.9N$$

برآیند دوهمنه $\vec{R_x}$ و $\vec{R_y}$ نیروئی است مانند $\vec{R}$ که اندازه آن چنین حساب می‌شود :

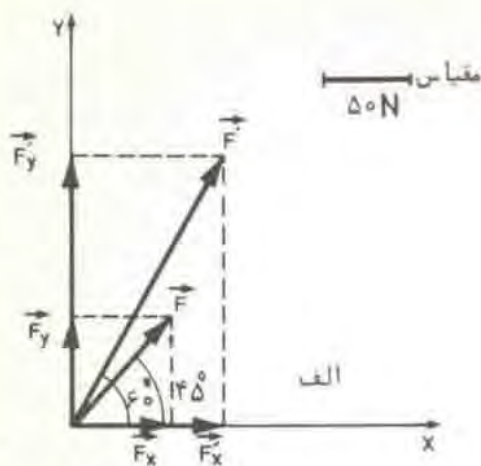
$$R^2 = (170.7)^2 + (243.9)^2 \simeq 2.91 \times 10^4 + 5.94 \times 10^4 = 8.85 \times 10^4$$

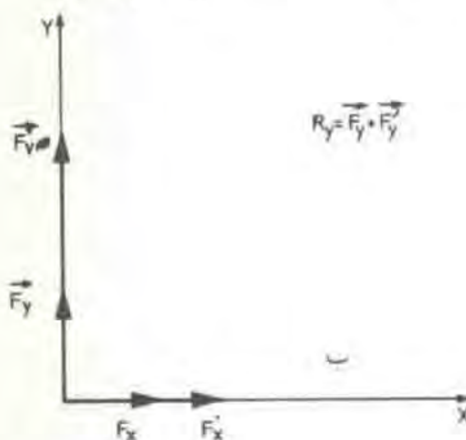
یا $R \simeq 298N$

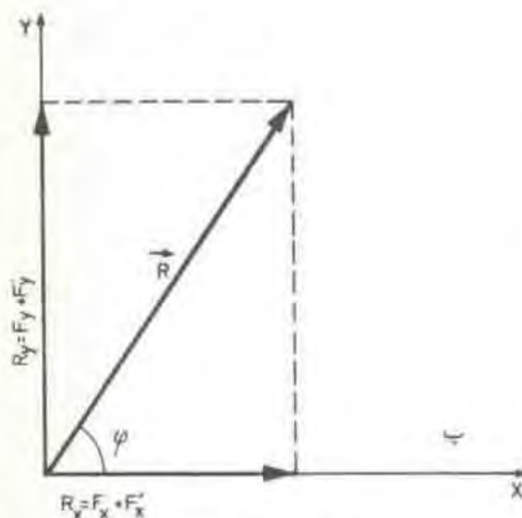
تانژانت زاویـه φ که برآیند $\vec{R}$ با محور x می‌سازد برابر است با :

$$tg\varphi = \frac{R_y}{R_x} = \frac{243.9}{170.7} \simeq 1.428$$

و $\varphi \simeq 55^\circ$







شکل ۴-۱۱- به‌کمك تجزیه بردارها به دو همنه عمودبرهم، برآیند آنها را آسانتر می‌توان بدست‌آورد .

به این ترتیب اندازه و وضع برآیند $\overrightarrow{R}$ در صفحه xy کاملا مشخص می‌شود (شکل ۴-۱۱-پ)

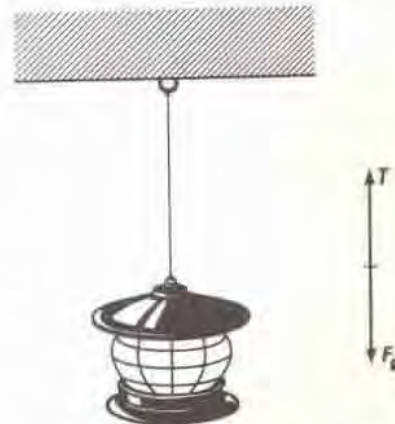
تعادل اجسام

گفتیم هرگاه بریك نقطه از جسمی دو یا چند نیرو اثر کند و برآیند این نیروها صفر باشد جسم یا ساکن می‌ماند و یا اگر درحرکت باشد با تندی ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. این خاصیت را به‌طریق زیر نیز می‌توانیم بیان کنیم:

هرگاه جسمی درحال سکون ویا درحال‌حرکت یکنواخت برخط راست باشد آن‌جسم درحال تعادل است وبرآیند تمام نیروهای وارد برآن صفراست.

اگر برجسمی که درحال تعادل است فقط دو نیرو اثر کند این دو نیرو باهم مساوی و دریك راستا هستند ولی درسوی مخالف یکدیگر بر جسم اثر می‌کنند مانند نیروهای وارد برچراغی که توسط یك طناب به‌سقف آویزان است (شکل ۴-۱۲).

دراین مثال نیروی وزن چراغ ونیروی کشش



شکل ۴-۱۲- تعادل چراغی که توسط یك طناب ازسقف آویزان است

طناب باهم مساوی ولی‌درسوی مخالف یکدیگرند.

پرسش ۴-۵ - درمورد کتابی که روی سطح یك میزقرارگرفته است چه نیروهائی باهم درحال تعادلند؟

اگرجسمی تحت اثرسه نیرو یا بیشتر به‌حال تعادل باشد بدیهی است برآیند این نیروها باید صفر باشد وراستای آنها نیزبایدازیك نقطه بگذرد (چه درغیراین‌صورت جسم حرکت‌دورانی‌خواهدداشت). مطالب بالارا درشرط زیرکه شرط اول‌تعادل[1] است خلاصه می‌کنیم:

برای این‌که جسمی تحت اثر چند نیرو به‌حال تعادل‌باشد باید برآیند نیروهای وارد برآن صفرباشد.

این شرط را به صورت رابطهٔ ریاضی زیر می‌نویسیم:

$$\Sigma \overrightarrow{F} = 0 \qquad (۴-۶)$$

(علامت Σ حرف یونانی باتلفظ سیگمااست).

اگر نیروهای وارد برجسم دریك‌صفحه‌باشند وقتی‌که برایند آنها صفراست برایند همنه‌های آنها روی محورهای x و y نیز صفراست یعنی:

$$\Sigma \overrightarrow{F_x} = 0 \quad \text{و} \quad \Sigma \overrightarrow{F_y} = 0 \qquad (۴-۷)$$

استفاده از ایـن خاصیت حل‌مسائل تعادل را بسیار آسان می‌کند.

مثال - چراغی به‌وزن 50N مطابق‌شکل ۴-۱۳-الف توسط دو طناب سبك به سقفی آویزان است اگرراستای طنابها باسقف زاویه‌های °۳۰ و °۴۵ بسازند نیروی کشش هریك ازدوطناب راحساب‌کنید.

۱- شرط دوم تعادل مربوط بجلوگیری از دوران جسم است ودرجای خود بیان خواهدشد.

ـ وزن‌چراغ‌را به $\vec{W}$ و نیروی کشش طنابها را به $\vec{F}$ و $\vec{F'}$ نمایش می‌دهیم و همنه‌های این‌نیروها را جداگانه روی دومحور x و y به‌دست‌می‌آوریم (شکل۴-۱۳ ـ ب) بنابه‌روابط (۴-۷) خواهیم‌داشت:

$$\Sigma F_x = F\cos 30^\circ - F'\cos 45^\circ = 0$$

یا

$$F\frac{\sqrt{3}}{2} = F'\frac{\sqrt{2}}{2}$$

و یا

$$F\sqrt{3} = F'\sqrt{2} \quad (1)$$

همچنین

$$\Sigma \vec{F_y} = F\sin 30^\circ + F'\sin 45^\circ - W = 0$$

یا

$$F \times \frac{1}{2} + F'\frac{\sqrt{2}}{2} = w = 50N$$

ویا

$$F + F'\sqrt{2} = 100N \quad (2)$$

ازترکیب دو رابطهٔ (۱) و (۲) نتیجه می‌شود

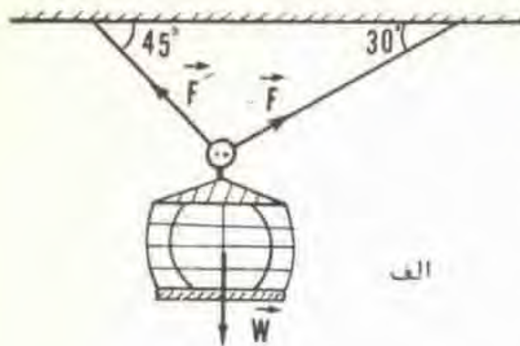
$$F + F\sqrt{3} = 100N$$

و

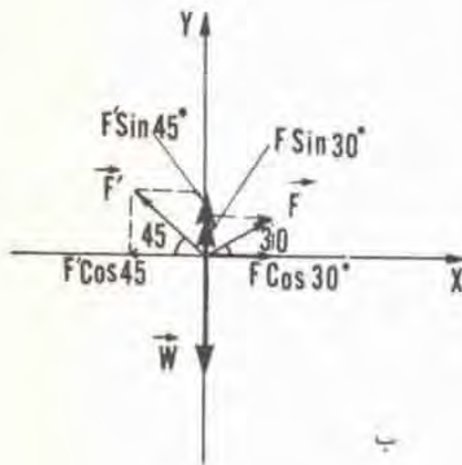
$$F = \frac{100N}{1+\sqrt{3}} = \frac{100(1-\sqrt{3})}{1-3} \simeq 36.6N$$

و

$$F' = F\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = \frac{F\times\sqrt{3}\times\sqrt{2}}{2} = \frac{36.6\sqrt{6}}{2} \simeq 44.8N$$



الف

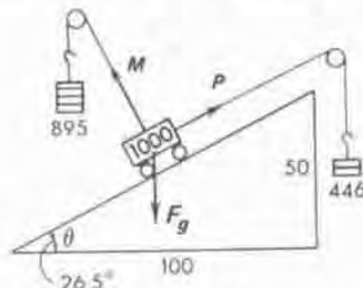


ب

شکل۴-۱۳- تعادل یک‌جسم تحت‌اثر سه‌نیروی متقارب

خودتان آزمایش کنید

تعادل یک ارابهٔ‌کوچک آزمایشگاهی (یا یک اتومبیل‌کوچک ازنوع اسباب بازی) واروی یک‌سطح شیب‌دارصیقلی مطابق شکل۴-۱۴ بررسی‌کنید . وزنه‌های‌آویخته به‌دوسرنخها و زاویهٔ



شکل۴-۱۴- بررسی تعادل یک‌ارابه روی سطح شیب‌دار

شیب سطح را طوری انتخاب کنید که راستای نخها برهم عمود شود (این حالت را می‌توانید با گونیا بررسی کنید) محور x ها را موازی با سطح شیب‌دار و محور y ها را عمود بر آن بگیرید و روابطه‌های $\Sigma\overrightarrow{F_x}=0$ و $\Sigma\overrightarrow{F_y}=0$ را بررسی کنید.

به‌این پرسشها پاسخ دهید

۱) چه کمیتهائی را با بردار نمایش می‌دهند؟

۲) چه اختلافی بین یك کمیت برداری و یك کمیت اسکالر است؟

۳) چرا برای نمایش هندسی بردارها باید مقیاس مناسبی اختیار کرد؟

۴) درچه صورت مجموع دو بردار با تفاضل آنها برابر است؟

۵) دونیرو، یکی به‌بزرگی ۱۰N و دیگری به بزرگی ۸ N به‌یك نقطه از جسمی اثر می‌کنند و جهت این نیروها را می‌توان به‌دلخواه تغییرداد.

الف ـ درچه‌صورت برایند این دونیرو بزرگترین مقدار خود را دارد واندازهٔ آن چیست؟

ب ـ درچه‌صورت برایند این دونیروکوچکترین مقدارخودرا دارد واندازه‌آن چیست؟

پ ـ آیا زاویه‌ای بین این دونیرو می‌توان یافت که به ازاء آن، جسمی که تحت اثر این دونیرو قرار دارد به‌حال تعادل باشد؟ توضیح دهید.

۶) جسمی تحت اثر سه نیروی متقارب به‌حال تعادل است. دونیروی دیگر براین جسم وارد می‌شود و بازهم جسم‌حالت‌تعادل خودرا حفظ می‌کند. این دونیروچه‌وضعی نسبت‌به‌هم‌دارند؟

۷) نشان دهیدکه وقتی یك بردار به‌دوهمنهٔ عمود برهم تجزیه می‌شود بزرگی هریك از همنه‌ها همواره‌کوچکتر ازبزرگی بردار است.

۸) شخصی صندوق سنگینی را توسط طنابی که به‌یك‌نقطه نزدیك قاعدهٔ آن بسته است روی یك سطح افقی می‌کشد و مشاهده می‌کند وقتی طول طناب دراز است صندوق آسانتر از وقتی‌که طول آن کوتاه است کشیده می‌شود. علت را توضیح دهید.

۹) شخصی درخیابانهای یك‌شهر ۱km به‌طرف شمال، ۵ km به‌طرف مغرب، ۳km به‌طرف جنوب و ۷ km به‌طرف مشرق راه می‌رود. بردار تغییرمکان این‌شخص را با رسم‌یك نمودار نمایش دهید و اندازه آن را حساب کنید.

۱۰) از دسته نیروهای دوتائی زیر با توجه به راستاهائی که می‌توانند داشته باشند کدامشان ممکن است همنه‌های نیروی ۱۰ نیوتن باشند؟

الف) ۹N و ۲N

ب) $6N$ و $2N$

پ) $5N$ و $5N$

ت) $10N$ و $10N$

۱۱) بامراجعه به‌شکل ۳ـ۱۳ اگرطول‌دوطناب برابرباشدنشان دهیدوقتی‌که زاویه بین‌دو طناب‌افزایش‌می‌یابد نیروی‌کشش‌طنابهانیزافزایش می‌یابد. نشان دهیدکه به‌ازاء زاویه‌های‌بزرگتر از $120°$ کشش هریك ازطنابها از وزن خود چراغ بزرگتر است .

۱۲) نسبت بین مجموع وتفاضل دونیروی مساوی ، هریك به‌بزرگی **F** راکه بریك نقطه اثرکرده وباهم زاویه $60°$ می‌سازند به‌دست‌آورید .

این مسئله‌ها را حل کنید

این‌مسئله‌ها را نخست از راه رسم نمودار باانتخاب مقیاس مناسب برای نمایش بردارها، حل‌کرده وجوابها را از راه اندازه‌گیری نتایج به‌دست آورید (زاویه‌ها را به‌کمك نقاله اندازه بگیرید) سپس جوابها را با محاسبه‌کنترل کنید .

۱) دونیروی متقاطع $28/0N$ و $34/0N$ به‌یك‌نقطه ازجسمی وارد مـی‌شود اگرزاویه بین این دو نیرو $37°$ باشد اندازه برایند این دونیرو و زاویـه بین راستاهای نیروی بزرگتر و نیروی برایند را به‌دست آورید $\sin 37° \simeq 0/6$.

جواب : $58/0N$ تقریباً $16°/5$

۲) یك چراغ خیابان به‌وزن $150N$ به‌وسیله دو رشته سیم به‌طول مساوی وسط خیابانی آویزان است . دوسرسیمها به‌دوتیر چراغ یکسان‌که در دوطرف خیابان مقابل هم نصب‌شده‌اند درارتفاع مساوی ازسطح زمین بسته شده‌است وراستای هرسیم باامتداد افق زاویه $30°$می‌سازد. نیروی‌کشش هریك از سیمها را معین‌کنید .

جواب : $150N$

۳) قایق‌سواری می‌خواهدقایق خودرا ازیك‌طرف رودخانه‌ای به‌طرف دیگرآن‌ببرد. سرعت حرکت قایق بررویآب ساکن$4\frac{m}{s}$ وسرعت حرکت آب رودخانه که در تمام نقاط مسیر حرکت قایق ثابت فرض می‌شود $2\frac{m}{s}$ وعرض رودخانه $50m$ است .

الف ـ قایق درچه جهتی باید سمت بگیردتا درست به‌نقطهٔ مقابل مبدأ حـرکت خود به کناره دیگر رودخانه برسد ؟

ب ــ اگرمحور قایق درست در راستای عمود برمسیر آب توجیه شود، قایق درچه‌نقطه‌ای به‌کنارهٔ دیگر رودخانه خواهد رسید ؟ زمان این حرکت را نیز حساب‌کنید .

جواب : الف ـ محور قایق باید با راستای عمود برجریان آب زاویــه ۳۰° (درجهت مخالف جریان آب) بسازد .

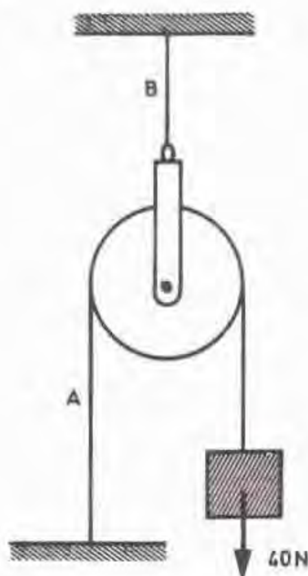
ب ـ ۲۵ متر دورتر ازنقطه مقابل مبدأ حرکت به‌کناره دیگررودخانه می‌رسد. ۱۲/۵ ثانیه .

۴) میلهٔ یکنواختی به وزن ۶۰N از دوسر به‌وسیله دو ریسمان سبك وهم‌طول به‌نقطه‌ای آویزان است و راستای هریك از دو ریسمان با میله زاویه ۶۰° می‌سازد نیروی‌کشش هریـك از ریسمانها را معین‌کنید .

جواب : $۲۰\sqrt{۳}$N

۵) درشکل ۴ـ۱۵ ، سنگینی قرقره ۴N و سنگینی وزنه آویخته به سر ریسمان ۴۰N و سنگینی ریسمان و اصطکاك قرقره ناچیز است . نیروی کشش ریسمان در بالای قرقره‌کدام است؟

۱ـ ۴۴N ۲ـ ۸۴N ۳ـ ۴N ۴ـ ۲۴N

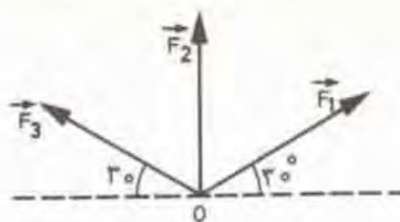


شکل ۴ـ۱۵

۶) سه نیروی مساوی $\vec{F_1}$ و $\vec{F_2}$ و $\vec{F_3}$ که راستای آنها دریك صفحه قائم واقع است مطابق شکل۴ـ۱۶ به‌نقطه O اثر می‌کنند . اگر F اندازه هریك‌ازاین نیروها باشد اندازه براینـد آنهاکدام است؟

۱ـ F ۲ـ ۲F ۳ـ ۳F ۴ـ $۲\sqrt{۳}$F

جواب‌درست را با استفاده ازروش تجزیه نیروها به دومهنه x و y آسانتر می‌توانید به‌دست‌آورید.



شکل ۴-۱۶

۷) یك واگون به‌جرم $5 \times 10^{3}kg$ روی‌تپه‌ای‌که زاویه شیب‌آن نسبت به‌سطح افق °۳۰ است‌توسط یك کابل کـه باسطح تپه موازی است بـا تندی ثابت به‌طرف بالا کشیده می‌شود . اگرنیروی اصطکاك بین چرخهای واگون و ریل ناچیزباشد اندازه سه نیروئی را که در تعادل دینامیکی این‌واگون مؤثرند به دست‌آورید وآنها را نمایش دهید .

جواب : $4/90 \times 10^{4}N$ و $2/45 \times 10^{4}N$ و $4/24 \times 10^{4}N$

۸) نیروی $1000N$ به دومهنه عمود برهم چنان تجزیه شده است کـه بزرگی یکی از مهنه‌ها سه‌برابر دیگری است . اندازه هریك ازمهنه‌ها و زاویه بین مهنه بزرگتر ونیروی اصلی را معین‌کنید .

جواب : تقریباً $315N$ و $945N$ و °۱۸

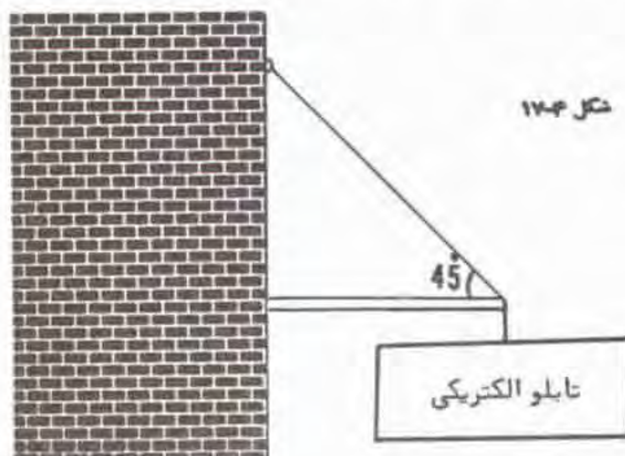
۹) جرم غلتکی ۸۰ کیلوگرم است . اگر بردسته غلتك هنگامی‌که زاویه آن با سطح افق ۶۰ درجه است نیروی $250N$ وارد شود غلتك بـا سرعت ثابت روی سطح افقی زمین به‌جلو رانده می‌شود مطلوب است :

الف ــ اندازه مهنه‌های افقی وقائم نیروی وارد بردسته غلتك .

ب ــ نیروئی‌که دراین حالت ازطرف غلتك برسطح زمین وارد می‌شود .

جواب : الف ــ $125N$ و $\simeq 216N$ ب ــ $1000N$

۱۰) یك تابلو تبلیغاتی الکتریکی به وزن $500N$ مطابق شکل ۴-۱۷ توسط یك سیم‌که



شکل ۴-۱۷

زاویه °۴۵ با یك میلهٔ افقی می‌سازد به دیوار آویزان شده است . اگر وزن میله در مقابل وزن تابلو ناچیز باشد .

الف ـ اندازه نیروی کشش سیم چقدراست ؟

ب ـ چه‌نیروئی ازطرف میلهٔ افقی بر دیوار وارد می‌شود ؟

جواب : الف ـ N ۷۰۷   ب ـ N ۵۰۰

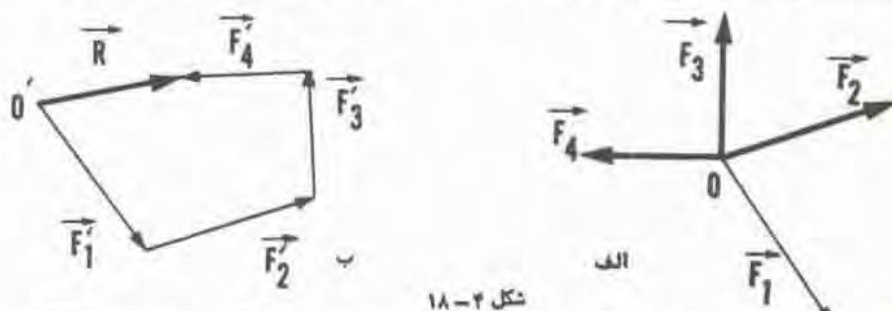
پاسخ به‌پرسشهای متن بخش

۴ـ۱) درصورتی که هردو بردار معرف یك کمیت فیزیکی بوده و بزرگی و جهت هردو یکی باشد .

۴ـ۲) نه ، ازشکلهای (۴-۴) و (۴ـ۵) نتیجه می‌شودکه : $\overrightarrow{A}+\overrightarrow{B}=\overrightarrow{B}+\overrightarrow{A}$

۴ـ۳) زیرا وزن یك جسم برابر نیروی جاذبه‌ای است کـه از طرف زمین برجسم وارد می‌شود . اندازه این نیرو با نیروسنج معین می‌شود و راستای آن قائم و جهتش متوجه مـرکز زمین است .

۴ـ۴) با استفاده ازچند ضلعی نیروکه در واقـع تعمیم روش مثلث است . مثلا در نظر بگیریم‌که چهار نیروی $\overrightarrow{F_1}$ و $\overrightarrow{F_2}$ و $\overrightarrow{F_3}$ و $\overrightarrow{F_4}$ مطابق شکل (۴ـ۱۸ الف) بریك نقطه‌ازجسمی مانند O اثر می‌کند ازنقطه اختیاری O' ابتدا بردار $\overrightarrow{F'_1}$ را مساوی و موازی و همسو با بردار $\overrightarrow{F_1}$ می‌کشیم . این بردار همسنگ بردار F_1 نیز نامیده مـی‌شود ، سپس ازانتهای آن بردار $\overrightarrow{F'_2}$ را همسنگ با $\overrightarrow{F_2}$ رسم می‌کنیم (شکل ۴ـ۱۸ ب) و عمل را به‌همین ترتیب ادامه می‌دهیم تا



شکل ۴ـ۱۸

همسنگ همهٔ نیروها رسم شود . اگر ازنقطه O' به انتهای بردار $\overrightarrow{F'_4}$ (که همسنگ $\overrightarrow{F_4}$ است) وصل کنیم بردار $\overrightarrow{R}$ به دست می‌آیدکه مجموع یا برایند این‌چهار بردار است ، یعنی اثر نیروی $\overrightarrow{R}$ برنقطه O در واقع معادل اثر چهار نیروی $\overrightarrow{F_1}$ و $\overrightarrow{F_2}$ و $\overrightarrow{F_3}$ و $\overrightarrow{F_4}$ بر این نقطه است .

۴ـ۵) نیروی وزن کتاب روبه‌پائین ونیروی برگرداننده الاستیك رو به بالا .

۵

اصطکاك ـ مقاومت هوا

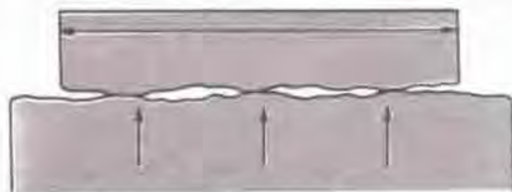
دربیشتر مسائلی‌که دربخش دینامیك مطرح کردیم از نیروی اصطکاك‌که مقاومت هوا هم جزوآن است صرف‌نظر کرده‌ایـم ، در صورتی‌که به جز موارد استثنائـی نادر معمولاً نیروی اصطکاك نقش مؤثری درحرکت اجسام دارد . درمواردی‌که نیروهای اصطکاك در مقابل حرکت جسم مؤثرند دیگـر نمی‌توانیم رابطه ساده $F=ma$ را بکار بریم و باید اثر نیروهای اصطکاك را در حـرکت جسم نیز منظور داریم . شمادرکتاب فیزیك سال اول بانیروی اصطکاك وعلت تولیدآن به‌خوبی آشنا شده‌اید[1] . دراین‌بخش ، به‌منظور یادآوری ، تذکر کوتاهی دربارهٔ نیروی اصطکاك خواهیم‌دادولی نقش‌آن به‌ویژه نقش‌مقاومت‌هوا را در دینامیك اجسام موردبحث قرار خواهیم داد.

اصطکاك ـ می‌دانیم وقتی‌که یك جسم جامـد روی یك سطح حرکت می‌کند نیروی اصطکاك‌که همواره درخلاف جهت حـرکت است درسطح تماس ظاهـر می‌شود . عوامل مؤثر درپیدایش این نیرو ، چنان که می‌دانیم عبارتند از ناهمواریهای سطح تماس و نیروهـای جاذبهٔ بین ملکولها و اتمهائی کـه در سطحهای‌کوچك با هم درتماسند (شکل ۵ـ۱) .

پرسش ۵-۱ ـ با سابقهٔ آشنائی‌که ازاین‌عوامل دارید بگوئید ناهمواریهای سطح تماس چه‌نقشی در نیروی اصطکاك دارد ؟

پرسش ۵-۲ ـ چرا وقتی‌کـه جسم سنگینتر باشد نیروی اصطکاك بیشتر است ؟

اصطکاك را در لحظه‌ای که جسم می‌خواهد به حرکت درآید « اصطکاك در آستانه حرکت » یـا « اصطکاك در حال سکون » و اصطکاك را موقعی‌که جسم درحرکت است « اصطکاك درحال



شکل ۵ـ۱ـ سطح تماس واقعی دوجسم درمقایسه با سطح تماس ظاهری خیلی‌کوچکتر است .

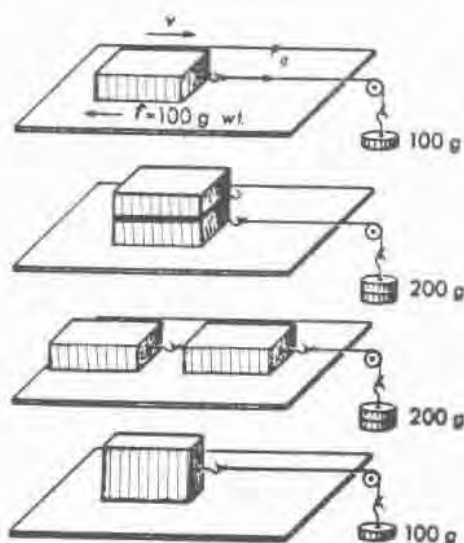
۱ـ برای به خاطر آوردن علل تولید نیروی اصطکاك بـه‌کتاب فیزیك سال اول ، بخش ۴ مراجعه‌کنید

حرکت» می‌نامیم . آزمایش نشان می‌دهد که نیروی اصطکاك در آستانه حرکت (یانیروی اصطکاك در حال‌سکون) بزرگتر از نیروی اصطکاك درحال‌حرکت است. علت این است که وقتی سطح دوجسم ، به‌ویژه سطح دوفلز به‌هم فشرده می‌شوند درنقاط تماس به‌سبب اعمال فشار زیاد ، یك‌نوع جوش خوردگی موقتی بین دوماده حاصل می‌شود . به‌عبارت‌دیگر، اتمها و ملکولها درسطوح تماس چنان به‌هم نزدیك می‌شوند که نیروهای جاذبهٔ ملکولی بین‌آنها ذرات میکروسکپی ماده‌را ازیك‌جسم به‌جسم‌دیگر می‌برند. درلحظهٔ شروع حرکت ، این‌جوش‌خوردگیها باید پاره شوند وبه‌همین جهت نیروی اصطکاك درلحظهٔ آغازحرکت بیشتراست . اگرسطح تماس دوجسم به‌ویژه دوفلز کوچك ونیروی فشارنده بزرگ باشد اصطکاك بسیار زیاد می‌شود ، به عبارت دیگرجسم گیرمی‌کند . دراین‌حالت اگر دراثراعمال نیروی زیاد ، جسم به‌حرکت درآید سطوح مشترك تماس پاره وخراب می‌شوند و گرما نیز تولید می‌گردد . پدیده گیر کردن که اغلب بین دوفلز هم جنس اتفاق می‌افتد معمولا وقتی ظاهرمی‌شود که نیروی‌فشارنده به حدود $5 \times 10^{6} \frac{N}{m^{2}}$ (تقریباً $50 \frac{kgf}{cm^{2}}$) برسد . برای جلوگیری ازاین‌پدیده درمواردی که لازم‌باشد دوفلز ازجنس مختلف را کـه مناسبت داشته باشند انتخاب می‌کنند .

اصطکاکهارا می‌توان به‌سه‌دسته تقسیم‌کرد: اصطکاك لغزشی ، اصطکاك غلتشی و اصطکاك سیالها. اصطکاکهای‌لغزشی‌وغلتشی‌معمولاویژه‌جامدات و اصطکاك سیالهـا مخصوص مایعات و گازهاست . به‌طور کلی در سرعتهای‌کم ، اصطکاك لغزشی از اصطکاك سیالها بیشتر است ولی‌درسرعتهای زیاد برعکس اصطکاك سیالها بیشتراست .

اصطکاك لغزشی- اصطکاك لغزشی هنگامی ظاهر می‌شود که یك جسم برروی یك جسم دیگر کشیده شود. با یك آزمایش ساده کـه طرح آن در شکل (۵-۲) نشان داده شده است می‌توانیم چگونگی اصطکاك لغزشی را درآزمایشگاه بررسی کنیم :

درشکل الف یك‌قطعه‌چوب به‌جرم $0/500 kg$ (۵۰۰ گرم) نمایش داده شده است که با نیروی‌افقی F_0 (دراین‌جاوزنه‌آویزان ۱۰۰ گرمی) باسرعت‌ثابت روی سطح میز کشیده می‌شود[1] این بدان معنی است



شکل ۵-۲- نیروی اصطکاك لغزشی متناسب با نیروی فشارنده عمودی است و ارتباطی با سطح ظاهری تماس جسم ندارد

۱- به‌جای وزنه وقرقره و نخ می‌توان از یك نیروسنج استفاده کرد (به بخش ۴ کتاب فیزیك سال اول مراجعه کنید) .

که اگر نیروئی کمتر از $F_{\circ}$ برجسم اعمال شود جسم حرکت نمی‌کند و اگر نیروئی بزرگتر از $F_{\circ}$ بر آن وارد شود شتاب می‌گیرد .

بنابراین $F_{\circ}$ که برای غلبه بر اصطکاك لغزشی اعمال می‌شود برابر نیروی اصطکاك لغزشی است که اندازه آن را به f نمایش می‌دهیم .

درشکل ب یك قطعه چوب دیگر به‌جرم ۵۰۰ گرم روی قطعه اول گذاشته شده و درنتیجه نیروی فشارنده جسم برسطح، دوبرابر گردیده است. نیروی لازم برای لغزیدن جسم باسرعت ثابت برسطح میز نیز دوبرابر گردیده است (وزنه ۲۰۰ گرمی) . اگر باافزودن قطعه‌های چوب ۵۰۰ گرمی دیگر ، نیروی فشارنده سه وچهار برابر کنیم وزنه لازم برای لغزیدن جسم باسرعت ثابت نیز سه‌وچهاربرابر (یعنی ۳۰۰ گرم و ۴۰۰ گرم) خواهد شد . نتیجه آن‌که نیروی اصطکاك لغزشی مستقیماً متناسب با نیروی فشارنده عمود برسطح (N) است یعنی :

$$f = \mu N \qquad (۵-۱)$$

μ عددی است بدون دیمانسیون که «ضریب اصطکاك لغزشی» نام دارد . این‌ضریب ، چنان‌که می‌دانید بستگی به چگونگـی سطح تماس و جنس موادی‌که باهم درتماسند دارد و از رابطهٔ‌زیرحساب می‌شود :

$$\mu = \frac{f}{N} \qquad (۵-۲)$$

پرسش ۵-۳ ـ چرا μ بدون دیمانسیون‌است؟

پرسش ۵-۴ ـ در شکل (پ) دوقطعه چوب ۵۰۰ گرمی به‌دنبال‌هم‌بسته شده‌اند ونیروی‌اصطکاك برابر حالت (ب) است ودرشکل (ت) قطعه چوب ۵۰۰ گرمی ازپهلوی کوچکتر روی سطح میز قرار دارد و نیروی اصطکاك مانند حالت (الف) است . آیا می‌توانید علت را بیان‌کنید ؟

نتایج حاصل‌ازآزمایش بالا یا از آزمایشهای دیگری نظیرآن‌را می‌توان تا اندازه زیادی‌براساس نیروهای جاذبهٔ ملکولی توجیه‌کرد : معمولا سطح کل‌تماس‌یعنی سطحی‌که درآن‌نیروهای جاذبه‌ملکولی مؤثرند (به‌شکل ۵-۱ مراجعه‌کنید) نسبت به سطح ظاهری تماس کوچکتر است. وقتی‌که نیروی بزرگی عمود برسطح‌ظاهری تماس به‌جسم وارد مـی‌شود ، سطوح واقعی تماس، هم ازلحاظ تعداد وهم ازلحاظ ابعاد افزایش می‌یابد و برپـایه این‌کیفیت ، نتایج منطقی زیر حاصل می‌شود :

۱ـ سطح کل واقعی تماس متناسب بانیروی عمودی N است.

۲ـ سطح واقعی تماس ارتباطی با سطح ظاهری تماس ندارد .

۳ـ نیروی اصطکاك لغزشی متناسب با سطح واقعی تماس و در نتیجه متناسب با نیروی عمودی N است .

علاوه براینها آزمایش نشان می‌دهد کـه در سرعتهای از $\frac{m}{s}$ ۰/۱۰ به‌بالا نیروی اصطکاك‌لغزشی تقریباً ثابت می‌ماند .

اگر F ، اندازه نیروی افقی وارد بر جسمی که روی سطح افقی کشیده می‌شود ، بزرگتر از f (نیروی اصطکاك لغزشی) باشد جسم در اثرنیروی برایند $F - f$ شتاب می‌گیرد . دراین‌صورت قانون دوم نیوتن در باره حرکت ایـن جسم چنین نوشته

می‌شود[1] :

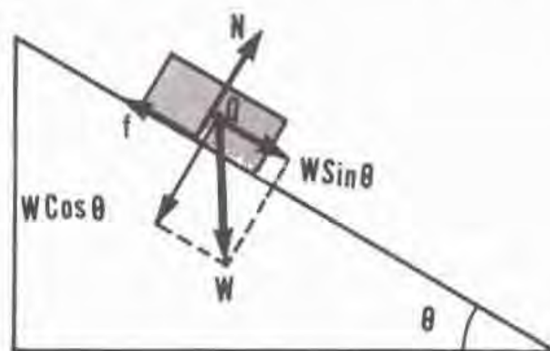
$$F - f = ma \qquad (۵-۳)$$

یا
$$F = f + ma$$

و یا
$$F = \mu N + ma$$

پرسش ۵-۵ ـ اگر جسم روی سطح افقی قرار گرفته باشد نیروی عمودی N برابر چیست ؟

زاویه لغزش یکنواخت ـ یکی از روشهای اندازه ـ گیری ضریب اصطکاك لغزشی این است که قطعه معینی از ماده جامد موردنظر را روی سطح شیب‌داری که شیب آن قابل تغییر است مـی گذارند و زاویه شیب سطح را آن‌قدر تغییر می‌دهند تا این قطعه بـا سرعت ثابت به‌پائین بلغزد. دراین‌حالت اگر θ زاویه شیب سطح بـاشد همنه نیروی وزن این قطعه در راستای موازی با سطح شیب‌دار ، $W\sin\theta$ ، برابر f (نیروی اصطکاك لغزشی) وهمنه عمودی آن ، یعنی $W\cos\theta$ ، برابر N (نیروی فشارنده جسم بر سطح شیب‌دار) خواهد بود (شکل ۵-۳)



شکل ۵-۳ـ نمایش زاویه لغزش یکنواخت یك‌جسم به‌سطح‌شیب‌دار

وداریم :

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{W\sin\theta}{W\cos\theta}$$

ویا
$$\mu = tg\theta \qquad (۵-۴)$$

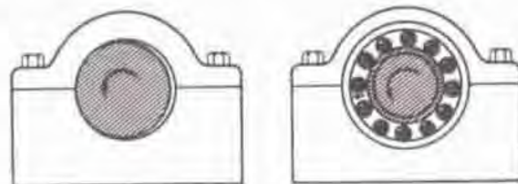
بنابراین ضـریب اصطکاك لغزشی μ برابر تانژانت زاویه شیب سطح شیب داری است که جسم بر روی آن با سرعت ثابت به پائین بلغزد . چنین زاویه‌ای را زاویه لغزش یکنواخت یا زاویه سرخوردن یکنواخت نامیده‌اند .

پرسش ۵-۶ ـ اگرزاویه‌شیب سطح شیب‌دار بزرگتر یاکوچکتر از زاویه لغزش یکنواخت بـاشد وضع جسم چگونه خواهد بود ؟

اصطکاك‌غلتشی ـ آزمایش ومشاهدات روزمره‌نشان می‌دهدکه اصطکاك غلتشی به‌مراتب کمتر از اصطکاك لغزشی است ، مثلا نیروی لازم برای حرکت دادن یك‌صندوق سنگین‌که روی یك چهارچرخه قراردارد خیلی کمتراز نیروئی است که بـرای کشیدن همین صندوق بـرسطح زمین لازم است . به همین جهت وسائط نقلیه را چرخ‌دار ساخته‌انـد و در بعضی از ماشینها به‌جای بالشتك (یاتاقان) لغزشی از بالشتك گوی‌دار[2] (ساچمه‌دار) استفاده می‌شود . علاوه‌براین باگریس‌کاری یا روغن زدن ، مانع اصطکاك فلز با

۱ـ بەمثال نمونه‌ای که ضمن مسائل بخش ۳ حل شده است مراجعه‌کنید .

۲ـ بلبیرینگ (Ball Bearing)



شکل ۵-۴- بالشتك لغزشی و بالشتك گوی‌دار (ساچمه‌ای)، نشان دهنده دو نوع اصطکاك لغزشی و اصطکاك غلتشی

فلز شده و اصطکاك را ناممکن است کـم‌می‌کنند[1]. درشکل۵-۴ دو نوع بالشتك، یکی گوی‌دار ودیگری لغزشی نشان داده شده است. وقتی‌که محور چرخ در بالشتك مـی‌چرخد گویهـا نیز درون شیاری می‌چرخند. هرچه چرخها وگویها همچنین سطح‌هائی که چرخها یاگویها روی‌آنهامی‌چرخند سخت‌ترباشند اصطکاك غلتشی‌کمتر مـی‌شود. در شکل ۵-۵، سه نوع چرخ نشان داده شده است‌که ازمقایسه‌آنها با هـم علت تولید اصطکاك غلتشی بهتر استنباط می‌شود.

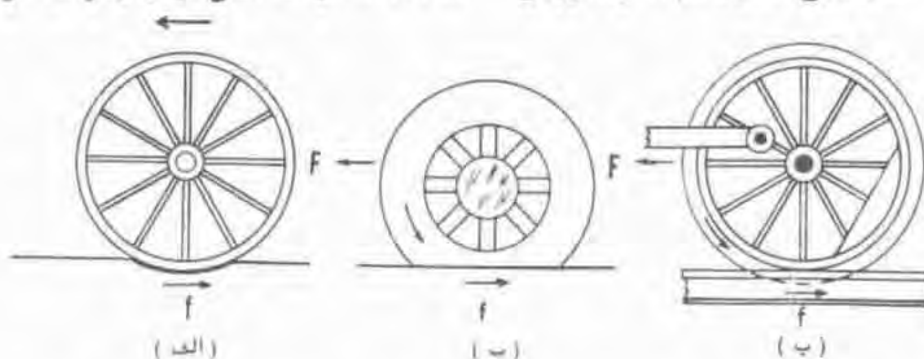
درحرکت یك‌چرخ سخت برروی زمین خاکی نرم (شکل الف)، چرخ به‌طوردائم با تودهٔ‌کوچکی ازخاك‌که در اثر نیروی جلوبرنده چرخ درجلوی‌آن متراکم می‌شود مواجه می‌گردد.

درحرکت یك چرخ نرم بر روی جاده سخت (شکل ب) اصطکاك دراثر تغییرشکل‌ظاهـری چرخ درمحل تماس با زمین حاصل می‌شود.

درحرکت چرخ‌سخت روی جاده سخت، چرخ و جاده هردو درمحل تماس تغییر شکل بسیار جزئی پیدامی‌کنند بنابراین اصطکاك غلتشی بسیارکم‌است.

ضریب اصطکاك غلتشی خیلی‌کمتراز ضریب اصطکاك لغزشی است. مثلا ضریب اصطکاك‌غلتشی لاستیك اتومبیل روی‌آسفالت خشك درحدود۰٫۰۳ است درصورتی‌کـه ضریب اصطکاك لغزشی همین لاستیك روی آسفالت خشك ۰٫۵ تا ۰٫۷ است.

اصطکاك سیالها - دریك سیال مانند گاز یا مـایع، اصطکاك (یا مقاومت دربرابرحرکت)، وقتی‌ظاهر می‌شودکه یاسیال‌گرداگرد یك مـانع ساکن جریان داشته باشد یـا این‌کـه جسمی درون سیال حرکت کند، مانند حرکت کشتی درآب وحرکت اتومبیل



شکل ۵-۵- اصطکاك غلتشی بین سطح سخت و نرم. (الف) - چرخ گاری. (ب) - چرخ اتومبیل. (پ) - چرخ لکوموتیو

1- درکتاب فیزیك سال اول دیدید که دربعضی از مواردکه سرعت چرخیدن چرخها خیلی زیاد است محورها بربالشی ازهوا قرار می‌گیرند.

وترن وهواپیما درهوا . بنابراین وقتی که می‌خواهیم اصطکاك سیالها را بررسی کنیم فرق نمی‌کند که جسم را ساکن وسیال را متحرك بگیریم یا برعکس، سیال را ساکن بگیریم و جسم را درون آن به‌حرکت درآوریم . تنها کافی است که سرعت حرکت نسبی جسم وسیال‌را منظور بداریم . دراین‌جا ما دوحالت را درنظر می‌گیریم : حالتی که سرعت حرکت سیال یا جسم کم است وحالتی که سرعت زیاد است .

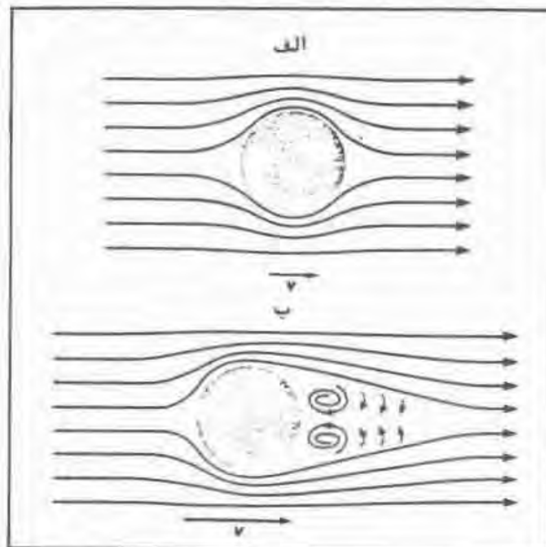
۱- آزمایش نشان می‌دهد که وقتی سرعت‌نسبی سیال و جسم کم است جریان سیال در اطراف جسم ملایم ومنظم است (شکل ۵-۶ الف) واصطکاك یا مقاومت سیال متناسب با سرعت است یعنی :

$$f = kv \qquad (۵-۵)$$

k ضریبی است که بستگی به خاصیت‌چسبناکی مایع وشکل و ابعاد جسم دارد . اگر سرعت اولیه جسم صفرباشد($v_{\circ} = \circ$) مقاومت سیال‌نیزصفراست. بنابراین نیروی وارد برجسم کلا صرف شتاب دادن به‌آن می‌شود . به‌تدریج که سرعت جسم افزایش می‌یابد اصطکاك سیال‌نیز افزایش می‌یابد و نیروی شتاب دهنده روبه‌کاهش می‌گذارد ولی تا وقتی‌که جریان سیال ملایم ومنظم است نیروی اصطکاك (یا مقاومت سیال) متناسب با سرعت است وقانون دوم نیوتن درباره حرکت جسم درسیال ، مانندرابطهٔ ۵-۳ به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$F - kv = ma \qquad (۶-۵)$$
$$F = kv + ma \qquad \text{یا}$$

باید درنظرداشت‌که روابط (۵-۵) و (۵-۶) فقط درباره جریانهای سیال ملایم ومنظم که‌سرعت آنهاکم است صادق است . این‌گونه جریانها را «جریان لایه‌ای» نیزمی‌گویند . (شکل۵-۶ الف)



شکل ۵-۶
الف ـ نمایش جریان لایه‌ای وقتی‌که سرعت‌کم است .
ب ـ نمایش جریان‌آشفته وقتی‌که سرعت زیاد است .

۲- وقتی که سرعت سیال افزایش می‌یابد حالتی فرا می‌رسد که درون سیال آشفتگی پدیدار می‌شود . دراین‌حالت نیروی اصطکاك سیال نیززیاد شده ومتناسب با مجذور سرعت می‌گردد . یعنی :

$$f = Tv^{2} \qquad (۷-۵)$$

T ، مانند k ضریبی است که بستگی به جنس سیال وشکل وابعاد جسم دارد .

ویژگی جریان آشفته این است که در عقب جسم جریانهای گردابی یا گردبادی‌کوچکی به‌وجود می‌آید (شکل۵-۶ ب) .

جریانهای گردابی (یا گردبادی) نه تنها سبب حرکت سریع سیال به خارج یا به‌دور جسم

می‌شوند بلکه مقدارقابل توجهی از انرژی جسم‌را نیزجذب می‌کنند و در واقع حرکت جسم‌را ترمز می‌نمایند . هرچه جذب انرژی بیشتر باشد کاهش انرژی جسم بیشتر و درنتیجه اصطکاك سیال هم بیشتر است .

اگرسرعت حرکت جسم باز هم زیاد شود جریانهای گردابی (یاگردبادی) به‌جای این که‌جفت متقارنی‌را تشکیل دهند یك‌درمیان در دوطرف‌دنباله حرکت جسم‌تشکیل می‌شوند (شکل۵-۷). هنگامی



شکل ۵-۷- جریانهای گردابی‌که دنبال یك جسم به هنگام حرکت سریع دریك سیال (مثلاآب) تشکیل می‌شود .

که‌سرعت‌حرکت‌جسم‌درسیال (مثلا درهوا) به‌سرعت صوت‌نزدیك می‌شود نیروی اصطکاك سیال نیزسریعاً افزایش می‌یابد ومتناسب با قوه سوم سرعت‌حرکت جسم می‌گردد یعنی :

$$f \propto v^3$$

سرعت حد ـ وقتی‌که یك جسم بدون‌سرعت اولیه دراثر وزن خود دریك مایع یا در یك‌گاز مانند هوا سقوط می‌کند ، سرعت‌آن و درنتیجه نیروی‌اصطکاك لحظه به‌لحظه افزایش می‌یابد تا این‌که اندازه این دونیرو برابر وزن جسم شود . دراین‌حالت برآیند نیروهای وارد برجسم صفرمی‌شود وجسم باسرعت ثابت سقوط می‌کند . این سرعت ثابت را « سرعت حد » نامیده‌اند . مثلا قطرات باران درهوا باسرعت حدی سقوط می‌کنندکه بستگی به ابعاد آنها دارد نه به ارتفاعی‌که ازآن‌جا فرو می‌ریزند .

سرعت حد برای ذرات کوچك ، مانند ذرات مه در هوا ، چندان‌کوچك است‌که جریان هوا در اطراف‌آنها لایه‌ای است واندازه این سرعت‌متناسب با وزن ذرات است .

متناسب بودن سرعت‌حد ذرات‌کوچك باوزن آنها ، نخستین‌بار توسط دانشمند انگلیسی‌استوکس[1] کشف شد واین‌کیفیت به‌نام قانون استوکس شناخته شده است .

سرعت حد سقوط اجسام بزرگ در هوا زیاد است ، بنابراین‌وقتی که‌این‌اجسام درهواسقوط‌می‌کنند درعقب‌آنها جریانهای گردبادی به‌وجود می‌آید و

1- Sir George G. Stokes (۱۸۱۹-۱۹۰۳ م) ریاضی‌دان و فیزیك‌دان انگلیسی که به‌سبب کارهای تحقیقی خود درزمینه هیدرودینامیك، انکسار مضاعف، دیفراکسیون و پلاریزاسیون‌نور مشهور است .

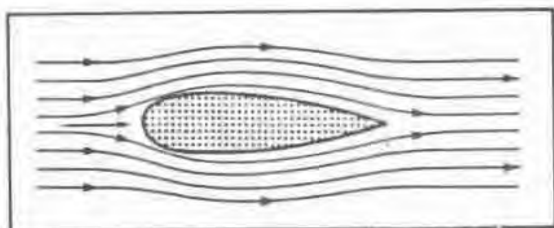
احتمالا قسمت اعظم مقاومت هوا به‌سبب ایجادهمین جریانهاست . دراین‌شرایط ، به‌ویژه موقعی که‌جسم شکل هندسی متقارنی دارد ، هم جریان‌لایه‌ای وهم جریان‌گردبادی هردو وجود دارنـد . هنگامی‌کـه سرعت جسم به‌حد می‌رسد داریم[1] :

$$F = kv_e + Tv_e^2 \qquad (۸-۵)$$

(F نمایش نیروی محرك و v_e نمایش سرعت حد است .)

مثلا يك چترباز وقتی کـه ازهواپیما بیرون می‌پرد اگر چترش بازنشود سرعت حد او به حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ کیلومتر درساعت خواهـد رسید . در چنین سرعتی نیروی مقاومت هوا برابروزن چترباز می‌شود .

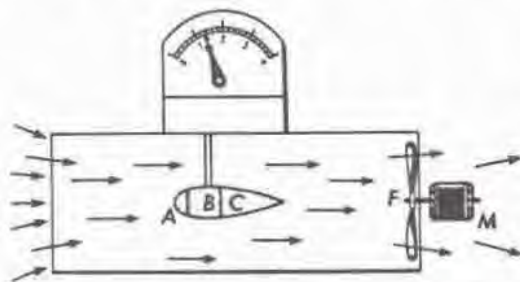
این رابطه نه‌تنها درباره‌ٔ اجسامی کـه درهوا سقوط مـی‌کنند به‌کار مـی‌رود بلکه بـرای حرکت هواپیما درهوا یا حرکت‌کشتی درآب نیزصادق‌است وسرعت حرکت‌آنها هنگامی ثابت می‌ماندکه‌نیروی مقاوم درست برابر نیروی محرك‌شود .



شکل ۵-۸- جریان هوا یا آب دراطراف جسمی‌که دوکی شکل است درسرعتهای زیادهم بدون آشفتگی است

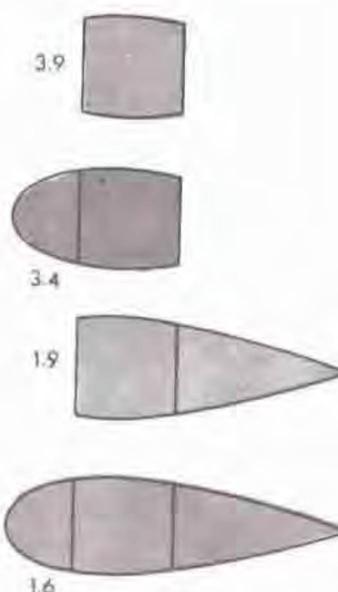
اثرشکل‌اجسام برمقاومت سیالها ـ شکل جسمی‌که درون يك سیال حرکت مـی‌کند درمقاومت سیال ، به ویژه در سرعتهای زیـاد بسیار مؤثر است زیـرا به‌طوری‌که دیدیم ، درسرعتهای زیاد ، جریانهـای گردبادی (یاگردابی) حاصل ازحرکت جسم‌مقاومت سیال را افزایش می‌دهند . با انتخاب شکل مناسب برای جسم ، می‌توان مقاومت سیال را به‌میزان‌زیاد کاهش داد . مثلا اگر جسم را مطابق شکل ۵-۸ دوکـی شکل بسازند جریانهـای‌گردابی خیلی‌کـم می‌شوند ، درنتیجه مقاومت سیال در مقابل حرکت جسم به‌کمترین مقدار خود می‌رسد .

شکل ۵-۹ طرح ساده‌ای ازيك تونل‌کوچك بادرا نشان می‌دهدکه درآن می‌توان اثرشکل جسم را درمیزان مقاومت هوا بررسی‌کرد . اجسام‌مورد آزمون را در وسط تونل به‌قلابی‌که به يك دستگاه نیروسنج متصل است‌آویخته ، جریان هوا راتوسط هواکش F درون تونل برقرار می‌سازند وقسمتهای



شکل ۵-۹- طرح ساده‌ای ازيك تونل‌کوچك باد برای آزمون اثرشکل جسم در مقاومت هوا

۱- در صورتی‌که جسم متحرك دارای محور تقارنی باشد که موازی با راستای حرکت آن قرارگرفته باشد ضریب T متناسب با بزرگترین سطح مقطع جسم عمود بر مسیر حرکت و متناسب با جرم حجمی هواست و علاوه براینها به‌شکل جسم نیز بستگی دارد .

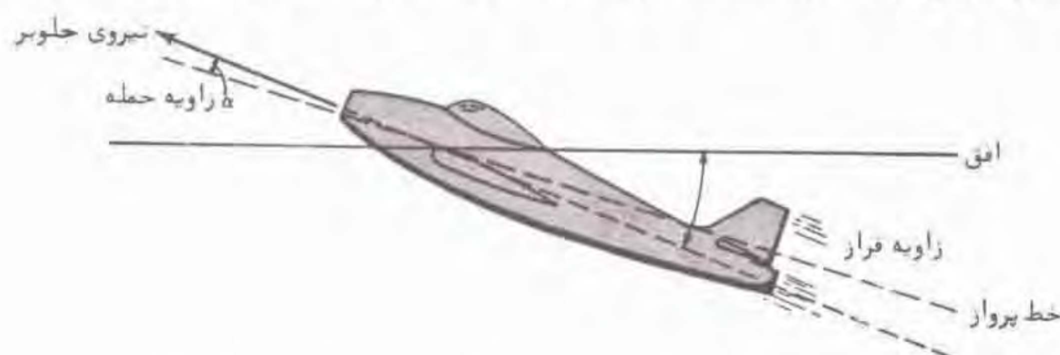


شکل ۵-۱۰- نمونه‌های مختلف آزمون برای تونل باد

مختلف نمونه را به‌ترتیبی‌که در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است موردآزمون قرار می‌دهند . آزمایش نشان می‌دهدکه وقتی جسم موردآزمون دوکی‌شکل (یعنی جلوآن‌گرد و دنبالهٔآن‌کشیده) باشد ، نیروی مقاومت هوا برروی‌آن‌کمترین‌مقداررا نسبت‌به‌اشکال دیگـر بـاهمان سطح مقطع خواهـد داشت . بدن هواپیماها وموشکها وکشتیها به ویژه زیردریائیها را دوکی‌شکل می‌سازند تا اثرمقاومت سیال برروی‌آنها به‌حداقل‌ممکن برسد و بـاهمان نیروی جلوبرنده با سرعت بیشتری حرکت‌کنند . بمبها را دوکی شکل می‌سازند تا بیشترین سرعت حد ممکن‌را هنگام‌رسیدن به هدف داشته بـاشند اتومبیلهای تندرو را به‌همین شکل می‌سازند تا بازده بیشتری در برابـر مصرف سوخت داشته باشند. بدن‌ماهیها وپرندگان تندپرواز نیز به‌پیروی ازطبیعت ، دوکی‌شکل است .

چگونه هواپیما پرواز می‌کند ؟ ـ گفتیم وقتی که هواپیمادرهواپروازمی‌کندنیروی‌مقاومت‌هوادرمقابل حرکت‌آن اغلب در اثر ایجاد جریانهای **گردبادی** حاصل می‌شودکه اندازه‌آن تقریباً متناسب بامجذور سرعت حرکت هواپیما است هنگامی‌که هواپیما بـا سرعت ثابت درارتفاع معینی پرواز می‌کند در حال تعادل دینامیکی است وبرآیند نیروهای خارجی‌وارد برآن صفراست .

شکل ۵-۱۱ یک‌هواپیما را در موقع بالا رفتن نشان می‌دهد ؛ اگرتندی صعودآن ثابت باشد شرایط تعادل‌برقرار است ونیروهای خارجی وارد برهواپیما درسه‌نیروی وزن و جلوبر واصطکاک (مقاومت‌هوا) خلاصه می‌شوند نیروی وزن (W) به مـرکز ثقل هواپیما اثرمی‌کند بدیهی است این‌نیرو در راستای



شکل ۵-۱۱- طرح ساده‌ای از یک هواپیما درحال بالا رفتن . زاویه α نمایش زاویه حمله است

قائم وجهتش روبه‌پائین است .

نیروی جلوبر(T)، ناشی ازمثلا خروج گازهای سوخت از موتـور جت استکـه در راستای محور هواپیما برآن اثر می‌کند .

نیروی اصطکاك (f) برآیند نیروهای مقاومت هوا بربدنه وبالهای هواپیماست که جهت آن رو به بالاست ولی نسبت به راستای قائم ، به‌طرف عقب هواپیما متمایل است . وضعیت نسبی این‌سه‌نیرو در شکل ۵-۱۲ به‌وسیله سه‌بردار ازیك‌نقطه‌نمایش‌داده شده است .

نیروی مقاومت هـوا را معمولاً به دوهمنه تجزیه می‌کنند ، یکی $\overrightarrow{F_N}$ عمود بـر راستای « خط پرواز»[1] که ما آن را « همنه بالابر » مـی‌نامیم و دیگری $\overrightarrow{F_R}$ موازی با خط پرواز کـه‌آن را « همنه عقب‌بر» می‌گوئیم .

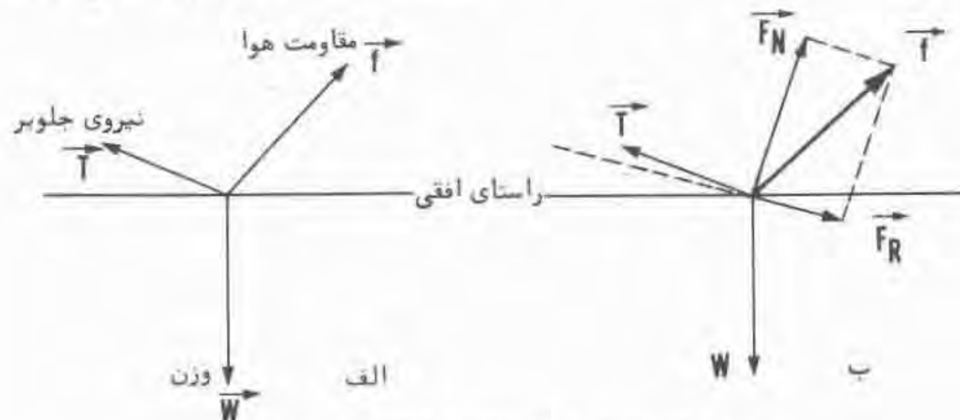
پرسش ۵-۷ ــ موقعی‌کـه هواپیما بـا تندی ثابت بالا می‌رود نیروی جلوبر T برچه‌نیروهائـی باید غلبه‌کند ؟

وقتی‌که هـواپیما دریك سطح‌افقی بـاسرعت ثابت‌پروازمی‌کند دونیروی T و F_R عملا افقی واز لحاظاندازه با هم مساوی هستند ولی‌درخلاف جهت یکدیگرند . دراین‌حالت، نیروی بالابر F_N مانند w در راستای قائم بوده واندازه‌آن برابر w ولی در خلاف جهت آن است .

پرسش ۵-۸ ــ موقعی که هواپیما بـا موتور خاموش وباسرعت‌ثابت فرودمی‌آید بین‌چه نیروهائی تعادل برقرار است ؟

سرعتهای فوق‌صوت ــ سرعتهای فوق صوت یعنی سرعتهائی‌که اندازه آنها ازسرعت صوت در هوای معمولی $\left(۳۴۰ \frac{m}{s}\right.$ یا تقریباً $\left.۱۲۰۰ \frac{km}{h}\right)$ بیشتر است .

تا چندسال پیش فقط گلوله‌های تفنگ یا توپ ممکن بود باچنین سرعتهائی حرکت‌کنند ولی‌امروزه پیشرفت سریع فن هواپیماسازی و راکت‌سازی سبب شده است‌که راکتها و بعضی از انواع هواپیماهای



شکل ۵-۱۲ـ نمودار نیروهای‌وارد برهواپیما به‌هنگام‌پرواز.
این‌نمودار نشان می‌دهدکه چگونه نیروهای بالابر و عقب‌بر ایجاد میشوند .

۱ـ خط‌پرواز هواپیما یعنی مسیری‌که هواپیما در امتداد آن پرواز می‌کند .

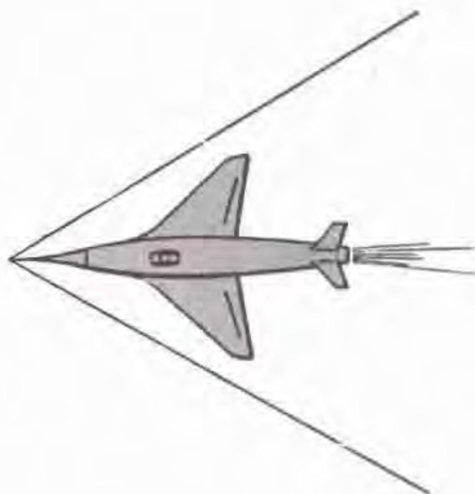
جت‌نیزبا سرعت فوق صوت درهوا حرکت‌کنند .

درمطالعه‌سرعتهای فوق صوت ، چنین‌متداول است که سرعت متحرك را با سرعت صوت مقایسه می‌کنند و نسبت سرعت متحرك به‌سرعت صوت را « عدد ماخ » می‌نامند :

$$\text{عدد ماخ} = \frac{\text{سرعت متحرك}}{\text{سرعت صوت}}$$

آزمایش نشان می‌دهدکه در سرعتهای فوق صوت ، قانونهای مقاومت هوا با حالتی‌که سرعتها زیر صوت[1] است تفاوت بسیار دارد ؛ به‌همین جهت مطالعه جریانهای خیلی سریع هوا دراطراف‌اجسامی که ابعاد وشکلهای گوناگون دارند اهمیت زیادپیدا کرده است .

وقتی‌که یك هواپیما یا یك راکت باسرعت بیش ازسرعت صوت حرکت می‌کند درهوای اطراف آن بریدگیهائی به‌وجود می‌آیدکه‌آنهارا «موجهای ضربتی» گویند . موجهای ضربتی‌که نمونه‌آنها در شکل (۵-۱۳) نمایش داده شده است دراثربرخورد سریع ملکولهای هوا با یك جسم سخت مانند هواپیما ایجاد می‌شوند . بررسیها واندازه‌گیریهای دقیق برروی نمونه‌های مورد آزمون درتونل باد[2] نشان می‌دهندکه وقتی عدد ماخ بین ۰/۸ و ۱/۲ (یعنی سرعت از ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلومتربرساعت) است پدیده‌ها خیلی‌پیچیده‌تر ازموقعی است‌که سرعتها کمتر یابیشتر ازحدود نامبرده است ؛ درتوده هوائی که جلو دماغه وبالهای هواپیما متراکم می‌شود



شکل ۵-۱۳- موج ضربتی‌که جلو هواپیما در پرواز باسرعت فوق صوت به‌وجود می‌آید

تغییرات فشارشدیدی به‌وجود می‌آیدکه این‌تغییرات ازمحل تولید خود با سرعت‌صوت به‌اطراف پخش می‌گردند. هنگامی‌که سرعت هواپیما درهوا کمتراز سرعت صوت است آشفتگیهای حاصل ازاین تغییر فشار ازجلو یا عقب هواپیما دور می‌شوند . ولی اگرهواپیما باسرعت صوت حرکت‌کند، این‌آشفتگیها همراه با هواپیما حرکت می‌کنند ومقاومت زیادی‌که این‌هوای‌آشفته درمقابل هواپیما ایجاد می‌کند همان موج ضربتی را درجلو دماغه هواپیما به وجود می‌آوردکه کم و بیش در شرایط پرواز هواپیما مؤثر است ، به‌همین جهت بالهای هواپیماهای تندپرواز را مطابق شکل ۵-۱۳ می‌سازند .

این موجهای ضربتی درسرعتهای فوق صوت پدیده‌ای به‌نام‌شکستن دیوارصوتی‌به‌وجود می‌آورند

۱- سرعتهای کمتراز $1000 \frac{km}{h}$ راکه برای‌آنها‌عدد ماخ کمتر از۰/۸ است سرعت زیر صوت نامیده‌اند .

۲- تونل باد را تونل ائرودینامیك (Aerodynamic) نیز می‌گویند .

که با صدای مهیبی مانند غرش رعد همراه است . این‌صدا درروی زمین شنیده می‌شود نه‌درهواپیمائی که آنرا تولید می‌کند . وقتی‌که چنین هواپیمایـی روی نقاط مسکونی درارتفاع کم پرواز می‌کندشدت صدای حاصل ازاین‌پدیده کافی است‌کـه شیشه‌های ساختمانها را بشکند ویا خسارات دیگری واردسازد.

خودتان آزمایش کنید

آزمایشهائی راکه درمتن این بخش برای تعیین نیروی اصطکاك وضریب اصطکاك‌لغزشی بیان شده است با اجسامی به‌شکل مکعب یا مکعب مستطیل از جنسهای متفاوت مانند چوب ، شیشه یا فلز ، هم روی سطح افقی وهم روی سطح شیب‌دارانجام دهید وضریب اصطکاك‌لغزشی را به‌دست آورید ونتایج را درجدولی مانند جدول ۵-۱ بنویسید .

(در روی سطح افقی به‌جای قرقره‌ونخ و وزنه می‌توانید از نیروسنج استفاده‌کنید وجسم را توسط نیروسنج در راستای افقی با سرعت ثابت بکشید) .

جدول (۵-۱) - تعیین ضریب اصطکاك لغزشی

جنس جسم	جنس‌سطحی‌که جسم روی‌آن حرکت می‌کند	نیروی‌اصطکاك f	نیروی فشارنده N	ضریب اصطکاك $\mu=\frac{f}{N}$	ملاحظات

هرآزمایش را دست‌کم سه بارتکرارکنید و اگراختلافی در نتایج حاصل مشاهده می‌کنید میانگین‌آنها را به دست آورید .

به‌این پرسشها پاسخ دهید

۱) دومورد نام ببریدکه نیروی اصطکاك لازم باشد و نقش نیروی اصطکاك را درآنها بیان کنید .

۲) آیا غیرمنطقی است که ضریب اصطکاک بزرگتر از یک باشد .

۳) چرا ضریب اصطکاک عددی است که واحد ندارد ؟

۴) وزنه مکعب شکلی به‌جرم m روی سطح شیب‌داری که باسطح افق زاویه θ می‌سازد متوقف است . اگرضریب اصطکاک لغزشی بین وزنه و سطح μ باشد نسبت بین کمترین نیروئی که لازم است تا این وزنه باتندی ثابت به‌طرف پائین بلغزد به‌کمترین نیروئی که لازم است تا این‌جسم باتندی ثابت به‌طرف بالاکشیده شود چیست ؟

۵) چرا در جاده یخبندان ، عمل ترمزکردن درمتوقف ساختن اتومبیل مؤثرنیست ؟

۶) سرعت حد سقوط یک‌جسم درهوا به‌کدام یک ازاین عوامل بستگی ندارد ؟

۱- شکل جسم ۲- جرم حجمی جسم ۳- جرم‌حجمی هوا ۴- سرعت پرتاب اولیه‌جسم توضیح دهید .

۷) با استفاده از روش چندضلعی (برای نشان دادن برآیند نیروها) نشان دهید که‌وقتی یک هواپیما با تندی‌ثابت بالا می‌رود ویا در سطح افقی پرواز می‌کند برآیند نیروهای خارجی وارد برآن صفر است .

۸) وقتی که گفته می‌شود سرعت یک هواپیما ۲/۵ ماخ است منظور چیست ؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱- یک صندوق فلزی به‌جرم ۷۵/۰kg روی کف افقی سالنی با نیروی ۳۵۰/۰N توسط یک‌طناب که امتدادآن باراستای افقی زاویه °۳۷ می‌سازد باسرعت ثابت کشیده می‌شود. ضریب اصطکاک بین کف سالن وصندوق را حساب‌کنید وبا رسم یک شکل ساده نیروهای وارد به‌صندوق را نمایش دهید .

جواب : ۰/۵۳۳

۲- یک‌جسم مکعب‌شکل فلزی به‌جرم ۵۰/۰kg روی یک‌سطح شیب‌دار چوبی که زاویه شیب‌آن نسبت به سطح افقی °۳۰ است به‌طرف پائین می‌لغزد . اگر ضریب اصطکاک لغزشی برابر ۰/۲۵۰ باشد شتاب حرکت این جسم را حساب کنید .

جواب : ۲/۷۸$\frac{m}{s^2}$

۳- دانش‌آموزی می‌خواهد ضریب اصطکاک لغزشی در حال سکون و در حال حرکت را بین یک جعبهٔ فلزی و سطح یک تخته اندازه بگیرد . جعبه را روی تخته که برسطح افقی قرار دارد می‌گذارد و یک‌سر تخته‌را به تدریج بالا می‌آورد وقتی که زاویه شیب تخته با سطح افق

به $30°$ می‌رسد جعبه شروع به‌حرکت می‌کند ومسافت یك‌متررا روی تخته دریك ثانیه می‌پیماید. با این‌مشاهدات دانش‌آموز چگونه می‌تواند اندازه این دوضریب اصطکاك را به‌دست‌آورد ؟

جواب : ۰/۵۷۶ و ۰/۳۴۲

۴- جسم مکعب مستطیل شکلی به‌جرم $2/00 kg$ با نیروی افقی F روی سطح‌دیوار اطاق نگاهداشته شده است . اگر ضریب اصطکاك درحال سکون بین دیـوار و جسم ۰/۶۰۰ باشد مطلوبست‌کمترین مقدار نیروی F برای این‌که جسم برسطح دیوار به پائین نلغزد .

جواب : $32/7N$

۵- دوگلوله‌که شعاع‌آنها برابر استیکی ازسرب ودیگری ازآلومینیم ساخته شده‌است. جرم حجمی سرب تقریباً ۴ برابر جرم حجمی آلومینیم است . این دوکره از ارتفاع زیـادسقوط می‌کنند . اگر نیروی مقاومت هوا در برابر حرکت یك کره به‌شعاع r کـه با سرعت v سقوط می‌کند به‌صورت $k\pi r^2v^2$ باشد نسبت بین سرعتهای حد این دوگلوله را حساب‌کنید .

جواب : $\frac{\text{سرعت حد گلوله سربی}}{\text{سرعت حدگلوله آلومینیمی}} = 2$

۶ ـ وقتی‌که یك جسم کروی به‌شعاع r درون یك مایع باسرعت v سقوط می‌کندنیروی مقاومت مایع دربرابر حرکت آن طبق قانون استوکس از رابطهٔ $f = 6\pi\eta rv$ به‌دست می‌آید که درآن η (حرف یونانی با تلفظ اتا) ضریب چسبناکی مایع نام دارد وتابع جنس مایع است .

اگر ρ جرم حجمی یك‌گلوله فلزی و ρ_0 جرم حجمی یك‌مایع باشد سرعت حداین‌گلوله را درمایع حساب‌کنید .

جواب : $\frac{2}{9}\frac{r^2}{\eta}(\rho-\rho_0)g$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۵

۵-۱) اگرسطح تماس دوجسم ناهموار باشد هنگام لغزیدن یك جسم برروی جسم دیگر به‌ویژه درسرعتهای خیلی کم ، این ناهمواریها درهم گیر می‌کنند و اصطکاك زیاد می‌شود .

۵-۲) هرچه وزن جسم زیادتر باشد ملکولهای بیشتری را درسطح دوجسم با هم تماس می‌دهد درنتیجه سطح تماس واقعی بزرگتر می‌شود وبرمیزان اصطکاك نیز افزوده می‌شود .

۵-۳) زیرا $\mu = \frac{f}{N}$ خارج قسمت دوکمیت هم‌جنس (یعنی دونیرو) است و خارج قسمت دوکمیت هم‌جنس همواره عدد بدون دیمانسیون است .

۵-۴) علت این است‌که نیروی اصطکاك بستگی به‌سطح تماس واقعی دارد نه سطح تماس

ظاهری، وسطح‌تماس واقعی متناسب بانیروی فشارنده است. وقتی‌که نیروی فشارنده ثابت بماند اصطکاك هم ثابت می‌ماند .

۵-۵) برابر وزن جسم .

۵-۶) اگرزاویه شیب سطح بزرگتراز زاویه لغزش یکنواخت باشد $w\sin\theta > f$ است در نتیجه جسم دراثرنیروی برآیند $w\sin\theta - f$ شتاب می‌گیرد وباحرکت تندشونده پائین می‌آید. اگر زاویه شیب سطح کوچکتراز زاویه لغزش یکنواخت‌باشد $w\sin\theta < f$ است وجسم نمی‌تواند حرکت‌کند وبرجای خود می‌ماند .

۵-۷) برنیروی عقب‌بر f_R و همنه وزن هواپیما در راستای خط پرواز .

۵-۸) بین F_R و همنه نیروی وزن در راستای خط پـرواز ، وبین F_N همنه نیروی وزن در راستای عمود برخط پرواز .

۶

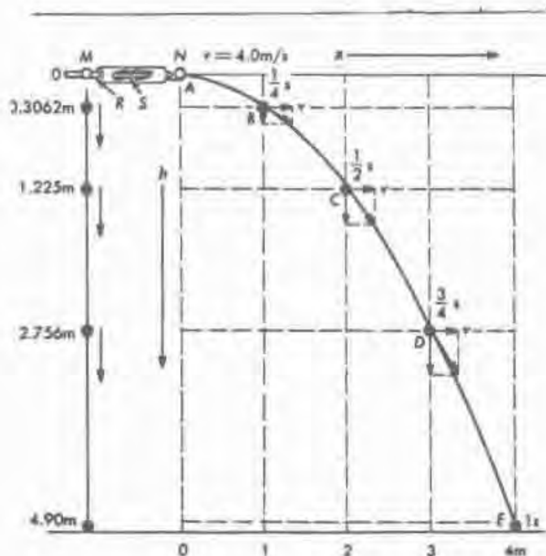
حرکت برمسیر منحنی یا حرکت درصفحه

دربخشهای پیش حرکت برخط راست (یعنی حرکت یك‌بعدی) را بررسی کردیم . دراین بخش می‌خواهیم حـرکت بر مسیر منحنی (یعنی حرکت دوبعدی) را مورد بحث قراردهیم . پاره‌ای از حرکتها مانند حرکت پرتابه‌ها ، یا حرکت برمسیر دایره دارای مسیر منحنی هستند ، به عبارت دیگرحرکت‌آنها دوبعدی است یعنی مسیرحرکتشان به‌جای این‌که یك خط راست باشد دریك صفحه است . دراین‌بخش نخست حرکت پرتابی را مورد بررسی قرار مـی‌دهیم سپس در بخش بعد به‌بحث دربارهٔ حرکت برمسیر دایره می‌پردازیم .

حرکت پرتابی ـ ابتدا حالت ساده‌ای از این نوع حرکت ، یعنی «پرتاب افقی» را بررسی می‌کنیم.

درنظر بگیریم‌که گلوله‌ای دریك لحظه از یك ارتفاع معین با تندی اولیه مشخصی درراستای افقی پرتاب شود و درهمین لحظه گلوله دیگری بـدون تندی اولیه ازهمین ارتفاع در راستای قائم به‌طور آزاد سقوط‌کند .

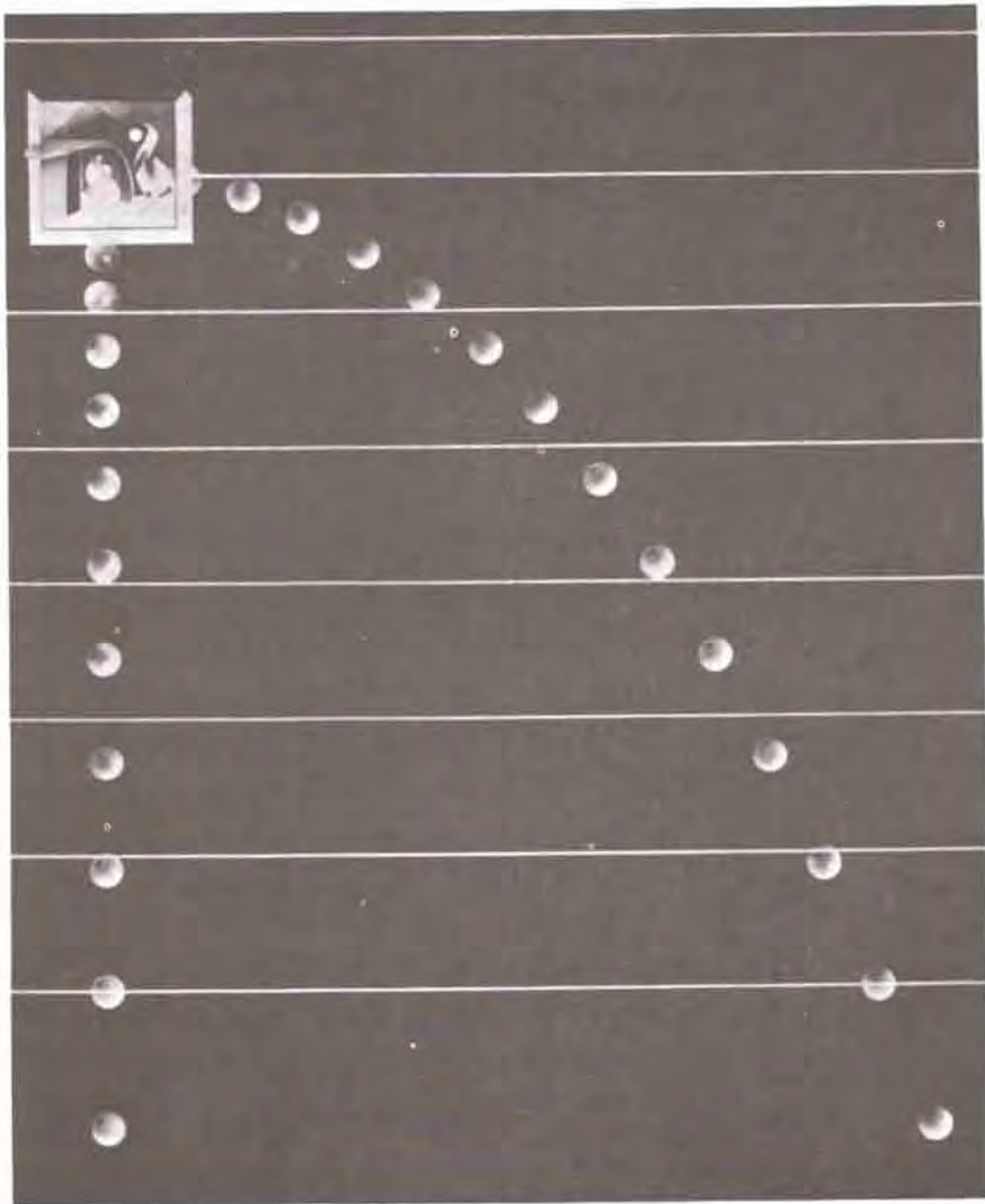
آزمایش نشان می‌دهدکه این دوگلوله باهم به‌سطح زمین می‌رسند . شکل ۶ـ۱ چگونگی‌اثبات تجربی این واقعیت را نشان مـی‌دهد : دوگلولـه یکسان M و N روی یك میلهٔ افقی قـرار دارند . با رهاکردن فنر S ، گلولـه N درامتداد افقی به طرف راست پرتاب می‌شود و درهمین لحظه‌گلوله M در راستای قائم باشتاب g سقوط می‌کند و بـاآن که‌گلولهٔ N مسیر بزرگتری را می‌پیماید هردوباهم به‌سطح زمین می‌رسند .



شکل ۶ـ۱ـ جسمی‌که درراستای‌قائم‌بدون‌تندی اولیه سقوط‌می‌کند و جسم دیگری‌که ازهمان ارتفاع درامتداد افقی پرتاب می‌شود باهم به‌سطح زمین می‌رسند

شکل (۶-۲) نمونه واقعی ازاین‌آزمایش را که‌ازگلوله‌ها درضمن حرکت، عکاسی استروبوسکپی شده است نشان می‌دهد.

اگراین‌آزمایش‌را درارتفاعهای مختلف‌تکرار کنیم وگلوله پرتابی را با سرعتهای متفاوت پرتاب نمائیم بازهم همین نتیجه را به‌دست خواهیم آورد.



شکل ۶-۲- عکاسی استروبوسکپی از دوگلوله یکی درراستای افقی ودیگری درراستای قائم همزمان شروع به‌حرکت‌کرده‌اند

تنها عاملی‌که ممکن است درنتیجهٔ آزمایش‌آشفتگی پدیدآورد مقاومت هوا به‌ویژه درسرعتهای‌زیاداست. اگر مقاومت هوا نباشد جسم ازهرارتفاعی و باهرتندی اولیه‌ای به‌طور افقی پرتاب شود زمان رسیدن‌آن به سطح زمین برابر زمانی خواهد بودکه یك‌جسم ازهمان ارتفاع باسقوط‌آزاد به‌سطح زمین می‌رسد. به‌عبارت دیگر شتاب پائین‌آمـدن هرجسمی‌که به‌طور افقـی پرتاب می‌شود ، درصورتی‌که اثرمقاومت هوابرآن ناچیزباشد باشتاب سقوط‌آزاد برابراست و ارتباطی باتندی پرتاب افقی وجابجائی افقی آن ندارد .

بنابراین حرکت پرتابی افقی را می‌توان به دوحرکت مستقل ازیکدیگر تجزیه‌کرد ، یکی‌باتندی افقی وثابت v در راستای افقی و دیگری بـاشتاب ثابت g در راستای قائم[1] .

تغییرمکان افقی گلوله‌ای‌که با تندی اولیه v به‌طور افقی پرتاب می‌شود پس از گذشت زمان t برابر است با :

$$x = vt \qquad (۶-۱)$$

پرسش ۶-۱ ـ چرا حرکت‌گلوله در راستای افقی یکنواخت است ؟

تغییرمکان این گلوله در راستای قائم پس از گذشت زمان t ، مانند سقوط آزاد ، برابراست با:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \qquad (۶-۲)$$

اعدادی‌که درشکل ۶-۲ روی دومحورافقی وعمودی نوشته شده است وضعیت‌گلوله N را که مثلا با تندی افقی $۴/۰\frac{m}{s}$ پـرتاب مـی‌شود در لحظه‌های ۰ و $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}$ و ۱ ثانیه نشان می‌دهد.

برای تعیین مسیر حرکت گلوله کافی است‌که t را از دومعادله (۶-۱) و (۶-۲) حـذف‌کنیم . ازمعادلهٔ (۶-۱) نتیجه می‌شود :

$$t = \frac{x}{v}$$

یا

$$t^2 = \frac{x^2}{v^2}$$

با قراردادن این مقدار در معادلهٔ ۶-۲ نتیجه می‌شود :

$$y = \left(\frac{g}{2v^2}\right)x^2 \qquad (۶-۳)$$

معادله (۶-۳) که می‌توان آن را به‌صورت $y = kx^2$ نوشت معادلـه یك سهمی است و نشان می‌دهدکه مسیر حرکت‌گلوله «سهمی شکل» است. منحنی ABCDE درشکل (۶-۱) نموداری از این معادلـه است . بـه ازای $v = ۴/۰\frac{m}{s}$ و $g = ۹/۸۰\frac{m}{s^2}$ و $x = ۴/۰m$

$$y = \left(\frac{۹/۸۰}{۲ \times ۴/۰^2}\right)۴/۰^2 = ۴/۹m$$

برای تعیین تندی‌گلوله درهرلحظه (یعنی در

---

[1] ۱- اگربخواهیم بنا به‌قراردادهای ریاضی حرکت‌گلوله را نسبت به‌دو محورافقی x و قائم y بسنجیم نقطه پرتاب‌گلوله را مبدأ مختصات می‌گیریم وجهت پرتاب افقی‌را جهت مثبت محور x ها و جهت حرکت در راستای قائم (دراینجا جهت روبه‌پائین) را جهت مثبت محور y ها می‌گیریم .

هرنقطه (ازمسیر) کافی است همنه‌های تندی آن را در دو راستای افقی و قائم حساب‌کنیم سپس با استفاده از جمع برداری ، تندی لحظه‌ای متحرك را بدست آوریم .

مثال ـ گلوله‌ای با تندی اولیه $۲۰/۰\frac{m}{s}$ در راستای افقی ازبالای برجی به ارتفاع $۴۰/۰m$ پرتاب می‌شود . اگر اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد .

الف) چه زمانی طول می‌کشد تا گلوله بـه سطح زمین برسد ؟

ب) باچه‌تندی به‌سطح زمین برخوردمی‌کند؟

ـ الف زمان حرکت گلوله برابر است با :

$$t=\sqrt{\frac{۲y}{g}}=\sqrt{\frac{۲\times ۴۰/۰}{۹/۸۰}}=\sqrt{\frac{۴۰/۰}{۴/۹۰}}=$$

$$\sqrt{\frac{۴۰۰}{۴۹/۰}}=\frac{۲۰}{۷}\simeq ۲/۸۶s$$

ب) همنه تندی گلوله در راستای قائم‌به‌هنگام رسیدن به‌زمین برابر است با :

$$v_y=gt=۹/۸۰\times\frac{۲۰}{۷}=۲۸/۰\frac{m}{s}$$

همنه افقی تندی هم‌که $v_x=۲۰/۰\frac{m}{s}$ است.

بنابراین تندی گلولـه در لحظهٔ برخورد بـه زمین برابر است با :

$$v=\sqrt{{v_x}^۲+{v_y}^۲}=$$

$$\sqrt{(۲۰/۰)^۲+(۲۸/۰)^۲}\simeq ۳۴/۱\frac{m}{s}$$

پرسش ۶-۲ ـ چگونه می‌توان راستای‌بردار تندی را درهرنقطه ازمسیر معین‌کرد ؟

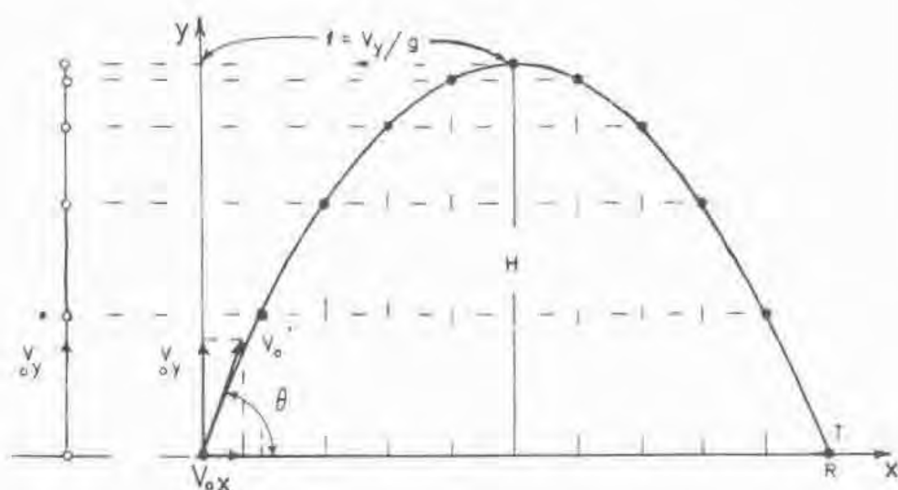
پرتاب در راستای غیرافقی ـ نمونه این‌نوع‌حرکت پرتابی ، پرتاب وزنه یـا دیسك توسط ورزشکاران ویـا پرتاب‌گلوله ازلولهٔ توپ در راستای غیرافقی است ، یعنی در راستائی که با امتداد افقی زاویه می‌سازد . این گونه اجسام پرتابی را به طورکلی « پرتابه » می‌نامیم . برای این‌که بررسی حرکت پرتابه‌هاآسان شود ازاثرمقاومت هوا برحرکت‌آنها صرفنظر می‌کنیم به‌عبارت دیگر حرکت ایده‌آل‌آنها را درخلاً درنظرمی‌گیریم دراین‌صورت نیروی‌مؤثر بر پرتابه فقط وزن آن است .

پرسش ۶-۳ ـ آیـا شتاب حرکت یك پرتابه دراین شرایط ثابت است ؟

شکل ۶-۳ مسیرواقعی حرکت پرتابی‌یك‌توپ

شکل ۶-۳-
مسیرواقعی یك‌پرتابه‌که ازآن‌عکاسی استروبوسکپی شده است





شکل ۶ــ ۴ ــ پرتابه‌ای‌که با تندی اولیه v_0 در راستائی‌که با امتداد افقی زاویهٔ θ می‌سازد به‌طرف بالا پرتاب شده است

پیسبال راکــه ازآن عکاسی استروبوسکپی شده‌است نشان می‌دهد ، مشاهده می‌شودکه این‌مسیر «سهمی شکل» است .

دربررسی‌حرکت یك پرتابه ، معمول این‌است که تندی پرتاب اولیه وزاویــه پــرتاب را مشخص می‌نمایند و بــه‌کمك این کمیتهای مشخص ، زمان حرکت پرتابه و ارتفاع اوج و برد آن را حساب می‌کنند .

به‌عنوان مثال درنظربگیریم که پرتابه‌ای بــا تندی اولیه v_0 در راستائی‌که با امتداد افقی زاویه θ می‌سازد به‌طرف بالا پرتاب شود (شکل ۶ــ۴) . نقطه پرتاب پرتابه را مبدأ مختصات مــی‌گیریم و همنه‌های تندی اولیه v_0 را روی دومحــور افقی x و قائم y کــه درصفحهٔ حرکت پرتابه در نظر گرفته شده‌اند به‌دست می‌آوریم . اندازه این‌همنه‌ها به‌ترتیب چنین است :

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos\theta \\ v_{0y} = v_0 \sin\theta \end{cases} \qquad (۴\text{–}۶)$$

این حرکت پرتابی نیز مانند حرکت پرتابی افقی نتیجهٔ‌ترکیب دوحرکت‌مستقل ازیك دیگراست:

یکی حرکت پرتابی یك ذره بــا تندی اولیه v_{0y} درراســای قائم به‌طرف بالا ودیگری‌حرکت یك ذره باتندی ثابت v_{0x} در راستای افقی[1] . به‌عبارت دیگر اگر پرتابه‌ای درشرایط خلأ[2] بــا تندی اولیه $v_{0y} = v_0 \sin\theta$ در راستای قائم به‌سوی بالا پرتاب شود به‌همان اندازه بالا خواهد رفت‌که پرتابه‌ای‌که باتندی v_0 تحت زاویه θ به‌طرف بالا پرتاب گردد بالا می‌رود . علاوه براین زمان رسیدن به‌نقطه‌اوج هردونیز یکی است .

۱ـ ازنظر هندسه می‌توان گفت که این دو حرکت، تصویرهای حرکت پرتابه بر روی دومحور x و y هستند.

بنابراین زمان رسیدن پرتابه به نقطه‌اوج مسیرخود (با توجه به قدر مطلق v_{oy} و g بدون درنظرگرفتن جهت‌آنها) برابراست با[1] :

$$t = \frac{v_{oy}}{g} = \frac{v_o \sin\theta}{g} \quad (۶-۵)$$

زمان رسیدن به اوج

می‌دانیم زمان رسیدن پرتابه‌به‌نقطه‌اوج برابر زمانی است‌که پرتابه ازنقطه اوج دوباره به سطح افق مبدأ پرتاب اولیه برمی‌گردد . بنابراین زمان کل حرکت پرتابه ، یعنی زمانی‌که لازم است تا پرتابه پس‌ازپرتاب بـه سطح افق مبدأ پرتاب خود برگردد برابر $2t$ خواهد بود و داریم :

$$T = \frac{2v_o \sin\theta}{g}$$ زمان کل‌حرکت پرتابه

محاسبهٔ ارتفاع اوج ـ ارتفاع اوج ، چنانکه در بخش ۲ دیدیم (با درنظرگرفتن قدر مطلق مقادیر v_{oy} و g) ازرابطه زیر حساب می‌شود :

$$(v_{oy})^2 = 2gH$$

یا

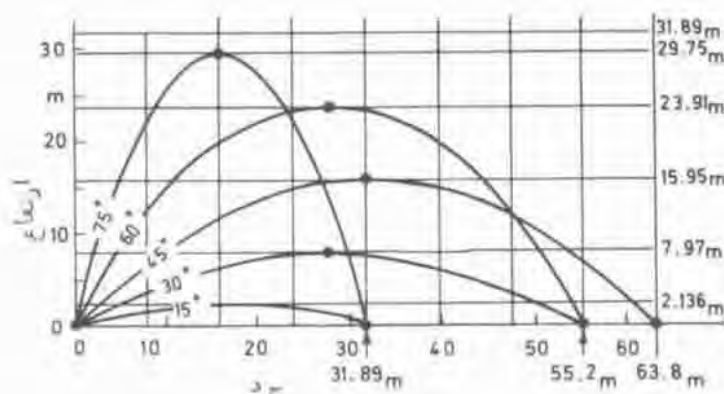
$$H = \frac{(v_{oy})^2}{2g}$$

ویا

$$H = \frac{(v_o \sin\theta)^2}{2g} \quad (۶-۷)$$

محاسبهٔ برد پرتابه ـ بردپرتابه بنابه‌تعریف‌عبارتست ازفاصله مبدأ پرتاب ازنقطه‌ای‌که پرتابه دوباره به سطح افق مبدأ پرتاب برمی‌گردد . برای محاسبه این فاصله‌که به R نمایش داده شده است از رابطهٔ $x = vt$ استفاده می‌کنیم . کافی است دراین رابطه R را به‌جای x و $v_o \cos\theta$ را به‌جای v بگذاریم و t را برابر $\frac{2v_o \sin\theta}{g}$ بگیریم . بنابراین :

$$R = v_o \cos\theta \times \frac{2v_o \sin\theta}{g} = \frac{2v_o^2 \sin\theta \cos\theta}{g}$$



شکل ۶–۵– برد پرتابه برای زاویه‌های پرتاب α+۴۵ و α−۴۵ یکی است .

۱ـ می‌توانید ازروابطی‌که دربخش ۲ درپرتاب در راستای قائم به‌کار بردید استفاده‌کنید و جهت v_{oy} و g را منظور دارید .

و یا

$$R=\frac{v_0^{2}\sin 2\theta}{g} \qquad (۸-۶)$$

این رابطه نشان می‌دهد که به‌ازاء تندی اولیه معین v_0 ، برد R درصورتی ماکزیمم است که $\sin 2\theta = 1$ ویا $2\theta = 90^\circ$ یعنی $\theta = 45^\circ$ باشد . علاوه‌براین ، به‌طوری‌که درشکل ۶-۵ دیده‌می‌شود، بردپرتابه برای زاویه‌های پرتاب ($45^\circ+\alpha$) و ($45^\circ-\alpha$) یکی است. مقادیر عددی‌که دراین‌شکل دیده‌می‌شود برای حالتی‌است‌که پرتابه باتندی اولیه $25\frac{m}{s}$ پرتاب شده است .

پرسش ۶-۴ - چگونه تندی پرتابه را در هر نقطه ازمسیرش حساب می‌کنید ؟

پرواز موشکها درفضا

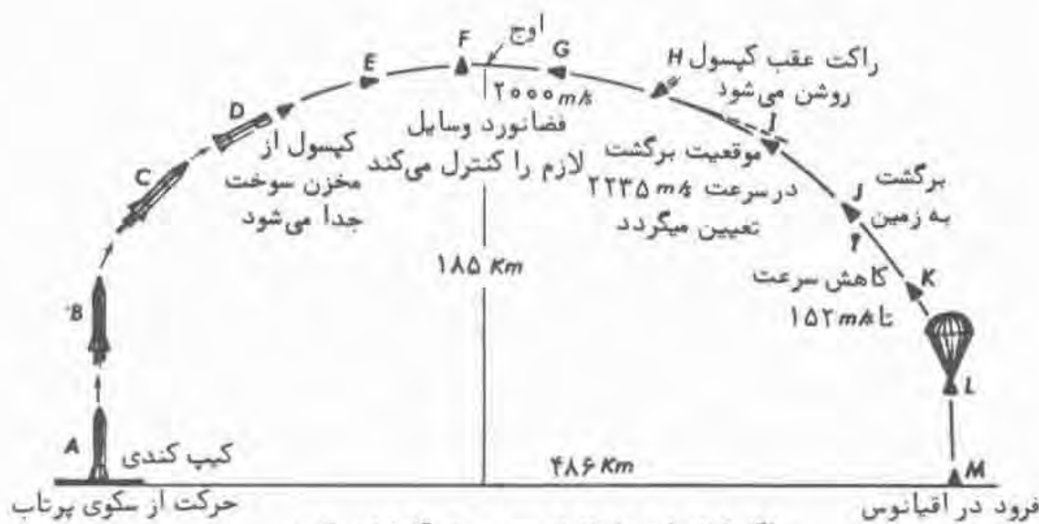
حرکت موشک (راکت) در فضا ، چنان‌که می‌دانیم ، به وسیله موتور عکس‌العملی صورت می‌گیرد‌که اساس‌کارآن ساده است : گازهای‌حاصل ازسوخت با فشار وسرعت زیاد از ته موشک خارج می‌شود و دراثر ضربه مداومی‌که هنگام خروج این گازها بردیواره داخلی موشک وارد می‌گرددموشک به‌جلو رانده می‌شود . (شکل۶-۶)

اگرنیروی رانش به‌اندازه‌کافی قوی و مدت اثرآن طولانی باشد تاموشک سرعت‌کافی پیداکند ، از میدان جاذبه زمین خارج می‌شود و درفضای‌تهی بین ستارگان به‌سوی هدف مورد نظر پیش می‌رود . اگرسرعت موشک‌کافی نباشد‌که‌آن‌را ازمیدان‌جاذبه زمین خارج‌کند ، یا دوباره به روی سطح زمین می‌افتد ویا به‌شکل ماهواره به‌گرد زمین می‌گردد.

بررسی حرکت یك موشك درهر مرحله‌ای که باشد مسئله پیچیده‌ای است . زیرا درهدایت پرواز آن به‌سوی هدف معین تعداد زیادی از عاملها و



شکل ۶-۶- موشك ژوپیتر درحال بلند شدن اززمین



شکل ۶-۷- طرح ساده‌ای از مسیر پرواز آلن‌شپارد نخستین فضانورد امریکائی (درسال ۱۹۶۱ میلادی)

متغیرها ، مانند مقاومت جو زمین در اوایل پرواز تغییر نیروی جلوبر موشك باگذشت زمان ، اثـر نیروی جاذبه خورشید وزمین وماه و سیاره‌های‌دیگر وقتی‌که مسئله‌مسافرت به‌کره ماه یا سیارات مطرح است ، تغییرجرم موشك به‌سبب خروج گازهای‌حاصل ازسوخت ذخیره شده درآن و .... باید درنظر گرفته شوند. شتاب‌لحظه‌ای‌حرکت‌موشك ضمن‌مطالعه قانون بقاءاندازه حرکت‌حساب می‌شود و محاسبه آن خارج از بـرنامه این کتاب است ، در این جا بـه عنوان مثال مراحل پرواز موشکی را کـه با آن نخستین فضانورد امریکائی به‌نام آلن‌شپارد[1] ، درون کپسول مرکوری به‌فضا پرتاب شد بیان می‌کنیم. شکل ۶-۷ طرح‌ساده‌ای‌ازمسیر ومراحل حرکت موشك‌وکپسول حامل این‌فضانورد را نشان می‌دهد . شرح‌جزئیات این حرکت‌خارج ازبحث این‌کتاب است[2] ولی‌دربارهٔ نیروهای وارد برموشك وفضانورد دربعضی‌ازمراحل پرواز به شرح مختصری می‌پردازیم . ارتفاع اوج این‌پرواز ۱۸۵ کیلومتر وبردآن ۴۸۵ کیلومتر بوده است . چون‌کاهش مقدار g در این ارتفاع کمتراز پنج‌درصد است و راستای $\vec{g}$ در برد ۴۸۵ کیلومتر نیزکمتر از ۵ درجه تغییر می‌کند می‌توان g را در تمام‌مسیر پرواز تقریباً ثابت‌گرفت .

اینك‌سه‌مرحله ازاین پروازرا درنظرمی‌گیریم:

مرحلهٔ یکم ــ قبل‌ازپرتاب موشك ــ در این مرحله موشك روی سکوی پرتاب قراردارد وآمادهٔ پرتاب است . همه سرعتها وشتابها صفروبین نیروها، تعادل برقرار است (شکل ۶-۸ ــ الف) . موشك ، دراین

Alan shepard -1

۲ـ جزئیـات این پرواز در دو شماره مورخه ۱۲ می و ۱۹ می سال ۱۹۶۱ میلادی مجله Life magazine به‌تفصیل شرح داده شده است .

حالت ، تحت‌تاثیر دونیرواست : یکی‌نیروی جاذبه زمین(یعنی وزن‌موشك) $\vec{w}=\vec{Mg}$ که آن‌را برسکو می‌فشارد وجهتش رو به پائین است ، دیگری نیروی عکس‌العمل $\vec{P_\circ}$ که از سکو به موشك وارد می‌شود و جهت‌آن رو به‌بالاست . بین این نیروها رابطهٔ برداری زیر برقرار است :

$$\vec{P_\circ}+\vec{Mg}=\circ \qquad (۹-۶)$$

ویا (اگرجهت مثبت را روبه‌بالا بگیریم)

$$P_\circ-Mg=\circ \qquad (۱۰-۶)$$

(M جرم کل موشك وبارهای آن است)

با استدلال مشابهی می‌توان گفت‌که در این مرحله به‌فضانورد درون‌کپسول هم‌که روی صندلی مخصوص خودقرار گرفته است دونیرو واردمی‌شود: یکی وزن فضانورد ($\vec{mg}$) رو به پائین و دیگری عکس‌العمل صندلی $\vec{p}$ روبه‌بالا به‌طوری‌که :

$$\vec{p}+\vec{mg}=\circ \qquad (۱۱-۶)$$

m جرم فضانورد است .

مرحلهٔ دوم ـ صعود موشك در راستای قائم ـ موشك پس‌از پرتاب ، در راستای قائم شتاب‌می‌گیرد وبالا می‌رود . دراین مرحله ، در هرلحظه جرم M موشك تحت تأثیر دو نیروی$\vec{P}$ (نیروی بالا برموشك ناشی از ضربه مداوم حاصل ازخروج گاز) روبه‌بالا و $\vec{Mg}$ (وزن موشك) روبه‌پائین قرار مـی‌گیرد (شکل ۶ـ۸ ـ ب) واگر ازاثرمقاومت هوا صرفنظر کنیم برآیند این دو نیرو است‌که به موشك شتاب می‌دهد . ولی چون جرم موشك مرتباً کاهش می‌یابد شتاب ثابت نیست . (محاسبه تقریبی این شتاب چنان کـه گفتیم ضمن مطالعه قانـون بقاء اندازه حرکت بررسی می‌شود).

اگردراین‌حالت نیروی‌بالابر وارد برفضانورد را بـه $\vec{p}$ و شتاب لحظه‌ای حرکت موشك را به $\vec{a}$ نمایش دهیم می‌توانیم قانون دوم نیوتن را درباره حرکت‌فضانورد به‌صورت رابطهٔ‌برداری زیر بنویسیم:

$$\vec{p}+\vec{mg}=\vec{ma} \qquad (۱۲-۶)$$

و چون جهت روبه‌بالا را مثبت گرفته‌ایـم اندازه نیروی p از رابطهٔ زیر حساب می‌شود :

$$p-mg=ma \qquad (۱۳-۶)$$

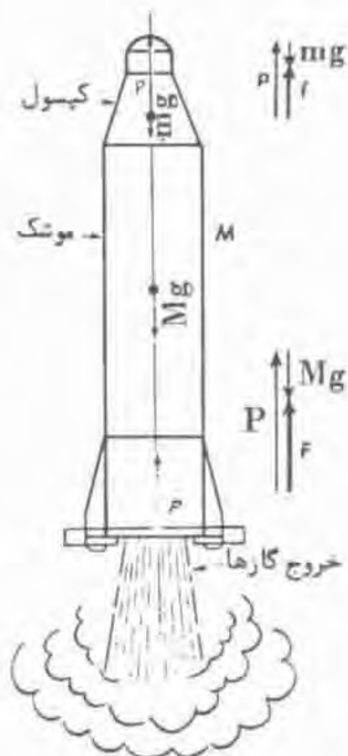
و یا

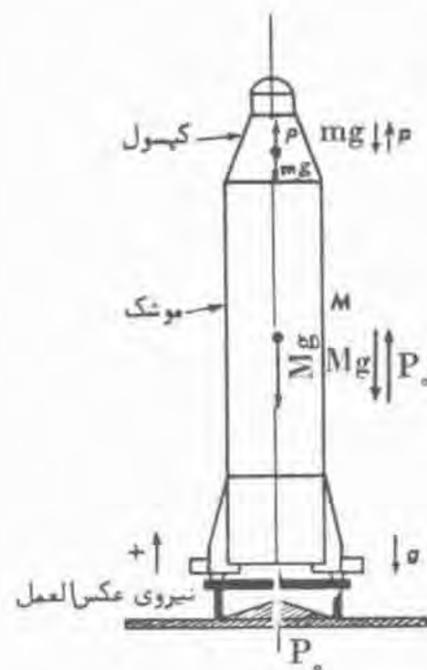
$$p=m(g+a) \qquad (۱۴-۶)$$

پرسش ۶ـ۵ ـ فرض کنید جـرم فضانورد $۸۰/\circ kg$ وشتاب حرکت موشك$\circ/۴۵\frac{m}{s^2}$ بـاشد چه نیروئـی از طرف صندلی فضانورد بر او وارد می‌شود ؟ دراین‌حالت وزن ظاهری فضانورد چیست؟

مرحلهٔ سوم ـ جدا شدن کپسول ازموشك ـ پس از آن‌که موشك درمسیر تعیین شده خود قرار گـرفت کپسول‌حامل‌فضانورد درنقطه‌ای مانند D (شکل۶ـ۷) ازموشك جدا می‌شود و درفضا به‌صورت یك‌پرتابی آزاد درمی‌آید . ازنقطه D تانقطه‌ای مانند H که در این نقطه موتوربرگشت دهنده کپسول به‌کارمی‌افتد، نیروی وارد برآن فقط جاذبه زمین است . این‌نیرو به‌کپسول‌شتاب سقوطی g می‌دهد وسبب می‌شود که کپسول به‌طور مداوم در طول مسیر پـرواز خـود تغییرجهت دهد .

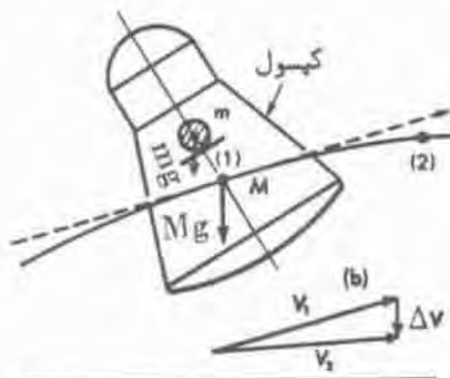
درشکل (۶ـ۸ ـ ج) در پائین شکل کپسول نمـودار تغییرتندی آن بین دو لحظهٔ t_1 و t_2 کـه کپسول از دو نقطه (۱) و (۲) می‌گذرد نشان داده





ب) مرحله دوم ـ نمودار نیروهای وارد برموشک‌وفضانورد در پرواز قائم، هنگامی‌که موشک تحت تأثیر نیروی بالابر موتور عکس‌العملی قرار دارد.

الف) مرحله یکم ـ نمودار نیروهای‌وارد برموشک وفضانورد درحالتی‌که موشک آماده پرواز است.



ج) کپسول حامل‌فضانورد بدون نیروی موتور همچون پرتابی آزاد درطول مسیر خود درفضا حرکت می‌کند.

شکل ۶ـ۸ـ مراحل مختلف پرواز یک موشک فضاپیما

شده‌است. $\vec{v}_1$ تندی کپسول درلحظهٔ عبوراز نقطه (۱) و v_2 تندی آن در لحظهٔ عبور از نقطه (۲) و Δv نمایش تغییر تندی آن در زمان $\Delta t = t_2 - t_1$ است. چون این تغییر تندی با شتاب $\vec{g}$ صورت می‌گیرد داریم:

$$\Delta \vec{v} = \vec{g} \cdot \Delta t$$

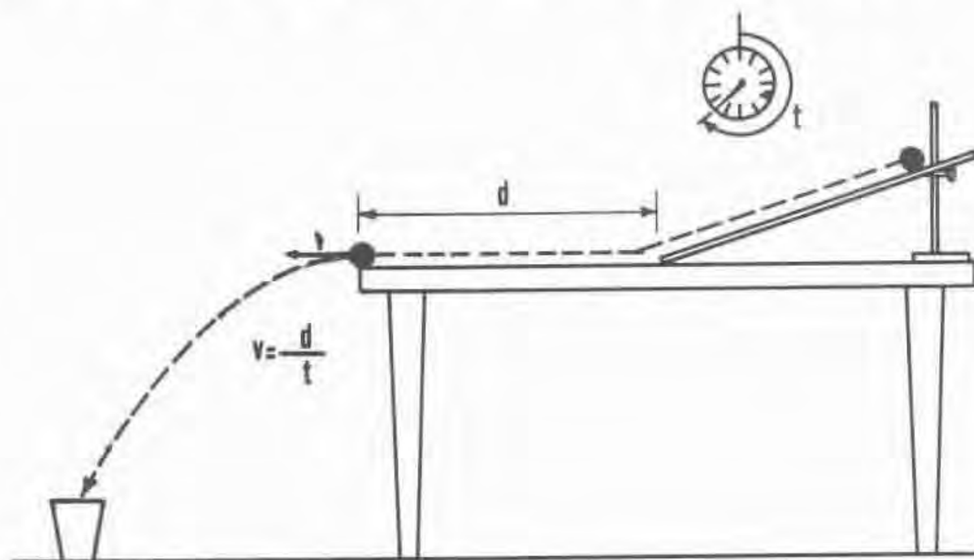
پرسش ۶-۶ - در این قسمت از مسیر، فضانورد احساس بی‌وزنی می‌کند. آیا می‌توانید علت آن‌را بیان کنید؟

اگر تندی کپسول به‌اندازهٔ کافی زیاد باشد (در این مثال درحدود $۷/۸\frac{km}{s}$) کپسول به‌صورت یك ماهواره روی یك‌مدار به‌دور زمین می‌گردد[1] برای برگرداندن کپسول به‌زمین موتورهای عکس‌العملی برگشت دهنده‌ای در آن تعبیه شده‌است که با به‌کار افتادن آنها تندی کپسول کاهش یافته و برای برگشت به زمین آماده می‌گردد. پروازشپارد اصولاً برای تمرین مرحله برگشت به‌زمین صورت گرفته است.

خودتان آزمایش کنید

مسیر یك‌حرکت پرتابی افقی را پیشگوئی کنید - با آزمایش ساده زیر می‌توانید محل برخورد یك گلوله راکه با سرعت معین ازلبهٔ یك میز به‌طور افقی پرتاب می‌شود پیشگوئی کنید:

گلوله‌ای را از درون شیار تخته شیب‌داری که مطابق شکل (۶-۹) آن را روی میزی



شکل ۶-۹

۱- اگر حداقل سرعت کپسول به ۱۱/۲ کیلومتر برثانیه (حدود $۴۰۰۰۰\frac{km}{h}$) برسد کپسول ازمیدان جاذبه زمین فرارمی‌کند. دراین‌حالت می‌توان آن‌را به‌سوی ماه یا سیاره دیگرهدایت کرد.

سوار کرده‌اید رها کنید و با یک کرونومتر زمان t را که لازم است تا گلوله مسافت افقی d را روی میز طی کند اندازه بگیرید . آزمایش را چندبار تکرار کنید و همواره گلوله را از یک نقطه معین از روی سطح شیب‌دار رها سازید و میانگین سرعت v را که سرعت پرتاب گلوله نیز هست حساب کنید $\left(v=\frac{d}{t}\right)$. توجه داشته باشید که گلوله همواره از یک نقطه معین از لبهٔ میز پرتـاب شود .

فاصله لبهٔ میز را از کف اطاق اندازه بگیرید (y) و از رابطهٔ $y=\left(\frac{g}{2v^2}\right)x^2$ اندازه x را حساب کنید . سپس یک هدف، مثلا یک لیوان کاغذی را درمحل برخورد پیشگوئی شده روی زمین بگذارید ، گلوله باید به هدف برخورد کند (توی لیوان بیفتد) .

تاچه اندازه به پیشگوئی خود اطمینان دارید ؟ چون پیشگوئی شما براساس اندازه گیری است درهر اندازه گیری معمولاً خطاهائی وارد می‌شود . اگـر آزمایش را چندبار تکرار کنید و هربار محل برخورد گلوله را به زمین نشان کنید مجموعه این نشانه‌ها درون سطح کوچکی پراکنده هستند که سطح معرف خطای آزمایش است . هرچه آزمایش دقیقتر صورت بگیرد پراکندگـی نقاط برخورد گلوله به زمین کمتر است .

به این پرسشها پاسخ دهید

۱) وقتی که پرتابه‌ای درشرایط خلأ به‌طور افقی پرتاب می‌شود :

الف ـ کدامیک ازهمنه‌های حرکت آن دارای تندی ثابت است ؟

ب ـ کدام همنهٔ حرکت آن دارای شتاب ثابت است ؟

پ ـ اگرتندی اولیه پرتاب افزایش یابد این افزایش تندی چه تأثیری در زمان رسیدن پرتابه به‌سطح زمین دارد ؟

۲) اگردر شرایط خلأ زاویه پرتاب یک پرتابه افزایش یابد ولی تندی پرتاب اولیـه آن ثابت بماند چه تغییری درکمیتهای زیر حاصل می‌شود ؟

۱ـ همنهٔ افقی تندی پرتابه .

۲ـ همنهٔ قائم تندی آن .

۳ـ شتاب حرکت آن .

۳) جسم A در راستای قائم به‌طرف بالاوجسم B در راستای قائم به‌طرف پائین وجسم C در راستای افقی هرسه ازیک نقطه معین باسرعت اولیه مساوی پرتاب می‌شوند اگرسرعت‌آنها هنگام رسیدن به زمین به‌ترتیب v_A و v_B و v_C باشد و از مقاومت هوا صرفنظر کنیم کـدام‌یک

از روابط زیر درست خواهد بود ؟

۱- $v_A > v_C > v_B$ ۲- $v_A = v_B = v_C$

۳- $v_B > v_C > v_A$ ۴- $v_A = v_B$ و $v_B > v_C$

پاسخ درست را با استدلال معین کنید .

۴) ازشرایط زیر کدامشان باید برقرار باشند تا رابطهٔ $y = kx^2$ معرف مسیر یک گلوله در پرتاب افقی باشد .

الف ــ شتاب g ثابت باشد .

ب ــ شتاب g بستگی به‌زمان t داشته باشد.

پ ــ سرعت پرتاب v بستگی به‌زمان t داشته‌باشد.

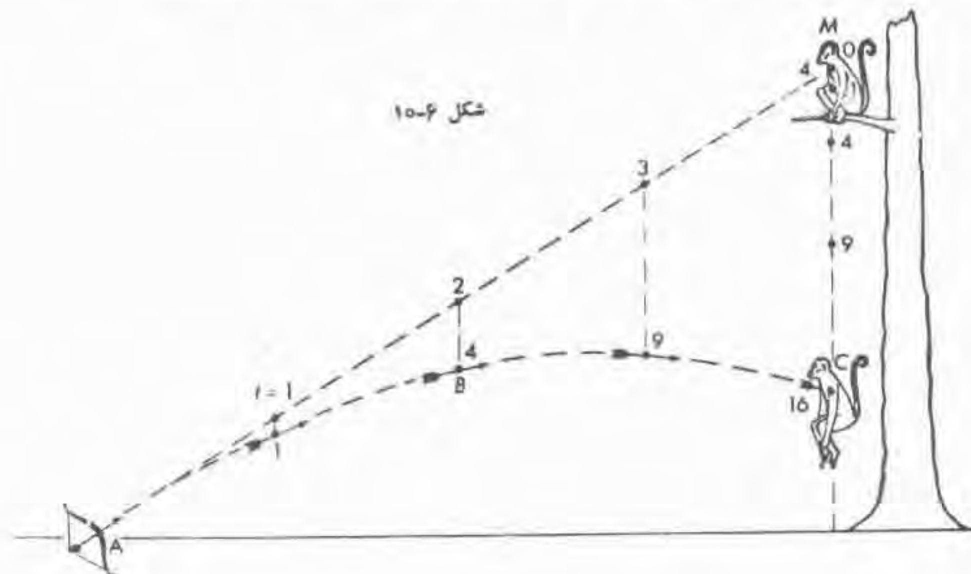
ت ــ مقاومت هوا ناچیز باشد .

۵) اگر سرعت حرکت پرتابه‌ای درهوا زیاد شود به‌طوری‌که اثر مقاومت هوا برحرکت پرتابه محسوس باشد مسیرواقعی حرکت پرتابه به‌نظرشما چگونه است؟ شکل تقریبی این مسیر را نمایش دهید .

۶) بامحاسبه نشان دهیدکه اندازه تندی یك پرتابه درهرنقطه ازمسیرش ، به ارتفاع h از سطح افق نقطه پرتاب ، برابر است با $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$ و از روی ایـن رابطه سرعت پرتابه را درنقطه اوج حساب‌کنید .

۷) همنه‌های تغییرمکان یك پرتابه راکه با زاویه α پرتاب می‌شود بر دو راستای افقی x و قائم y پیداکنید وپس ازحذف t ازبین دو رابطه حاصل ، معادله مسیر را به‌دست‌آورید.

۸) یك شکارچی با تیرکمان خود حیوانی راکه‌بالای‌شاخهٔ درختی است ازفاصلهٔ‌نسبتاًدوری هدف‌گیری می‌کند. (شکل ۶ـ۱۰)آیا تیر در راستای خط نشانه روی جلو می‌رود؟



شکل ۶ـ۱۰

فرض کنید در لحظه‌ای که تیرها می‌شود حیوان شاخه درخت را رهاکند و بدون سرعت اولیه به‌طورآزاد سقوط نماید. آیا تیر به حیوان برخورد خواهدکرد؟ توضیح دهید .

۹) درنظر بگیرید شخصی درون یك واگون که با تندی ثابتی حرکت می کند ایستاده‌است وگلوله‌ای‌را که در دست دارد بدون تندی اولیه رها می کند . توضیح دهید :

الف ــ مسیرحرکت گلوله نسبت به‌واگون چگونه است ؟

ب ــ مسیرحرکت گلوله نسبت به‌ناظری‌که کنار جاده ایستاده چگونه است ؟

پ ــ مسیر این حرکت نسبت به‌راننده اتومبیل دیگری که با همان تندی واگون همراه باآن اتومبیل خود را می‌راند چگونه است ؟

۱۰) اگر از درون یك وسیلهٔ نقلیه روبازکه با تندی ثابت حرکت می کند جسم کوچك و سنگینی (که اثر مقاومت هوا برآن ناچیزباشد) در راستای قائم به‌طرف بالاپرتاب شود باآن‌که وسیله نقلیه درحرکت است جسم‌دوباره به‌همان نقطه پرتاب برمی گردد؟ علت را توضیح دهید. ازدید ناظری‌که کنار جاده ایستاده مسیر حرکت این جسم چگونه است ؟ ازدید ناظر درون وسیله نقلیه مسیر این حرکت چگونه است ؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱) یك هلیکوپتر حامل مواد غذائی برای حیوانات صحرائی‌که در برف بی‌غذا مانده‌اند بسته‌های غذا می‌اندازد اگرموقعی‌کــه هلیکوپتر درارتفاع ۱۰۰/۰ متری سطح زمین باسرعت ۱۲۰ کیلومتر برساعت به‌طورافقی پرواز می کند بسته‌های غذائی ازآن رها شوند واثـرمقاومت هوا براین بسته‌ها ناچیز فرض شود ، هربسته پس از رها شدن ،

الف ـ چه مدت طول می کشد تا به‌سطح زمین برسد ؟

ب ـ چه‌مسافتی را در راستای افقی می‌پیماید تا به‌زمین برسد ؟

پ ـ باچه تندی و درچه راستائی به سطح زمین برخورد می کند ؟

جواب : الف ـ تقریباً $4/51\,s$ ب ـ $150\,m$ پ ـ $55/4\,\frac{m}{s}$ در راستائی که با امتداد قائم زاویه 37° می‌سازد .

۲) دریك هواپیمای جت جنگی توپی‌کارگذاشته شده است‌که سرعت پرتاب گلولــه آن موقعی‌که هواپیما درسطح زمین ساکن‌است $900\,\frac{km}{h}$ است.فرض‌کنید هواپیما در هوا با تندی ثابت $900\,\frac{km}{h}$ در سطح افقی به‌سمت شمال درپرواز است . اگر اثرهوا برحرکت گلوله توپ ناچیز

باشد کدام یك از مطالب زیر ازدید خلبان هواپیما درست است ؟

الف ــ وقتی که گلوله توپ درجهت حرکت هواپیما رو به شمال شلیك می‌شود تندی حرکت گلوله درجهت شمال $۱۸۰۰\frac{km}{h}$ است .

ب ــ موقعی که گلوله توپ درخلاف جهت حرکت هواپیما شلیك می‌شود گلوله درراستای قائم پائین می‌افتد .

پ ــ اگر گلوله در راستای قائم به‌طرف پائین شلیك‌شود ، ضمن سقوط باتندی $۹۰۰\frac{km}{h}$ به‌طرف شمال نیز جلو می‌رود .

ازدید چه ناظری مشاهدات الف و ب و پ ممکن است درست باشند ؟

۳) عرض هریك ازپلکان عمارتی ۰/۲۰ متر وارتفاع هریك ۰/۱۰ متر است . معین کنید باچه سرعتی یك جسم بایدازلبهٔ پلهٔ دهم به‌طورافقی پرتاب‌شود تادرست مماس برلبهٔ پلهٔ اول بگذرد.

جواب : $۴/۲\frac{m}{s}$

۴) یك توپ گلف ازنقطه‌ای که آن‌را مبدأ حرکت می‌گیریم باتندی اولیه $V_0 = ۷/۰\frac{m}{s}$ تحت زاویه $\alpha = \frac{\pi}{4}rad$ به‌طرف بالا پرتاب می‌شود . اگر از اثر مقاومت هوا بر آن صرفنظر شود مطلوب است :

الف ــ برد این توپ .

ب ــ ارتفاع اوج آن .

پ ــ زمان رسیدن آن به نقطه اوج .

ت ــ سرعت آن درنقطه اوج و در لحظهٔ برگشت به‌سطح افق پرتاب .

جواب : الف ــ $۵m$ ب ــ $۱/۲۵m$ پ ــ تقریباً $\frac{1}{2}$ ثانیه ت ــ $۴/۹۵\frac{m}{s}$ و $۷/۰\frac{m}{s}$

۵) تیری از یك کمان با سرعت اولیه $۴۶/۰\frac{m}{s}$ تحت زاویه °۷۰ به‌هوا پرتاب می‌شود. زمان کل حرکت و ارتفاع اوج وبرد آن را حساب کنید . اثرمقاومت هوا برآن ناچیزاست.

جواب : $T = ۸/۶۳s$ $H = ۹۳/۴۲m$ و $R = ۱۳۶/۰m$

۶) باچه زاویه‌ای باید درشرایط خلأ ، پرتابه‌ای را پرتاب‌کرد تا برد و ارتفاع اوج آن باهم برابر شود ؟

جواب : °۷۶

۷) می‌خواهند با تفنگی که سرعت گلوله آن ۵۰۰ متربرثانیه است هدف کوچکی راکه در فاصله ۱۵۰ متری آن واقع است وبا لوله تفنگ دریك سطح افقی قرار دارد نشانه‌گیری کنند.

معین کنید چه اندازه باید بالای نقطه وسط هدف‌را نشانه‌گیری کنند تا گلوله درست به‌وسط هدف برخوردکند . دراین محاسبه g را $10\frac{m}{s^2}$ بگیرید.

یادآوری ـ وقتی که زاویه‌ها خیلی کوچك باشند می‌توانید سینوس و تانژانت و خود زاویه را برحسب رادیان برابر بگیرید .

جواب : $0/25m$

۸) فرض کنید درآزمایش شکل۶ـ۹ تخته شیب‌دار روی میز طوری نصب شده که‌انتهای پائینی‌آن برلبهٔ میزمماس است، بطوری‌که گلوله پس‌از رسیدن به‌انتهای سطح شیب‌دار مستقیماً پرتاب می‌شود .

اگر ارتفاع میز $1/25m$ وزاویه شیب تخته $30°$ باشد وگلوله ازفاصله $1/00$ متری لبهٔ میز در روی سطح شیب‌دار بدون تندی اولیه رها شود درچه نقطه‌ای به‌سطح زمین برخورد می‌کند و درلحظهٔ برخورد به‌زمین همنه‌های افقی وقائم تندی آن چه‌اندازه است . ازاصطکاکها صرفنظر کنید .

جواب : $1/01m$ دورتر از پای‌میز $v_x = 2/71\frac{m}{s}$ و $v_y = 5/18\frac{m}{s}$

۹) نیروی موتورهای یك موشك ساترن[1] حامل‌آپولو $7/37 \times 10^6 N$ وجرم‌آن درلحظهٔ بلند شدن از زمین $5/4 \times 10^5 kg$ است . مطلوبست :

الف ـ شتاب حرکت موشك نسبت به سطح زمین درموقع بلندشدن از زمین .

ب ـ وزن ظاهری یك سرنشین آپولو درصورتی‌که جرم او $80kg$ باشد .

جواب : الف ـ $3/8\frac{m}{s^2}$ ب : $1088N$

پاسخ به‌پرسشهای متن بخش ۶

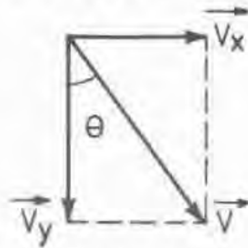
۶ـ۱) زیرا در راستای افقی نیروئی‌که به‌جسم شتاب بدهد وجود ندارد .

۶ـ۲) کافی است زاویه‌ای‌که بردار تندی لحظه‌ای با راستای قائم می‌سازدحساب شود . اگراین زاویه را مطابق شکل (۶ـ۱۱) به θ نمایش دهیم خواهیم داشت :

$$tg\theta = \frac{v_x}{v_y}$$

1- Saturn

راستای بردار تندی لحظه‌ای درهر نقطه ازمسیرحرکت برمنحنی مسیرمماس است .



شکل (۶-۱۱)

۶ـ۳) شتاب حرکت پرتابه درصورتی‌که مقاومت‌هوا ناچیز باشد همان شتاب جاذبه (g) است که راستای آن قائم وجهتش روبه‌پائین واندازه‌اش درمجاورت زمین ثابت است .

۶ـ۴) اندازه تندی پرتابه درهر نقطه از مسیر برابر اندازه برآیند همنه‌های تندی در راستاهای افقی وقائم است . (شکل ۶ـ۱۰) .

اندازه همنه تندی در راستای افقی همواره ثابت وبرابر $v_x = v_\circ \cos\theta$ است زیرا حرکت دراین راستا بدون شتاب‌است. اندازه‌همنهٔ تندی در راستای‌قائم (باتوجه‌به‌قدرمطلق g بدون‌منظور داشتن جهت وعلامت‌آن) درهرلحظه برابر است با $v_y = v_{\circ y} - gt$ ویا $v_y = v_\circ \sin\theta - gt$ زیرا حرکت دراین راستا تارسیدن به نقطه اوج کند شونده است . بدیهی است اندازه تندی پرتابه درهر نقطه‌ازمسیرازرابطه $v = \sqrt{v_x^۲ + v_y^۲}$ حساب می‌شود .

۶ـ۵) در نظر بگیریم‌که شتاب $۴۵/۰ \frac{m}{s^۲}$ معادل $\frac{۴۵/۰}{۹/۸۰} = ۴/۵۹g$ (یعنی ۴/۵۹ برابر g) است بنابراین :

$$p = m(g + ۴/۵۹g) = ۵/۵۹mg$$

یعنی نیروئی که ازطرف صندلی بر فضانورد وارد می‌شود ۵/۵۹ برابر وزن اوست که معادل است با :

$$۵/۵۹ \times ۸۰ \times ۹/۸۰ = ۴۳۸۳N$$

بدیهی است بنا به‌قانون سوم نیوتن ، نیروئی‌که فضانورد برصندلی خود وارد می‌سازد مساوی‌همین نیرو ولی‌درخلاف جهت‌آن است. بنابراین وزن ظاهری فضانورد برابر $۵/۵۹mg$ یا $۴۳۸۳N$ است .

۶ـ۶) علت این است‌که دراین قسمت ازمسیر ، P (نیروی موتور) وجود ندارد. بنابراین از طرف صندلی برفضانورد نیروئی وارد نمی‌شود . ازطرف فضانورد هم برصندلی‌نیروئی‌وارد نمی‌شود . دراین‌حالت ، کپسول وصندلی وفضانورد ، همه درحکم اجسامی هستند که باشتاب g سقوط می‌کنند ، چنان که گفتیم ، انسان حالت سقوط آزاد را مانند حالت بی‌وزنی احساس می‌کند.



حرکت برمسیر دایره‌ای
قانونهای کپلر ـ میدانهای جاذبه

یکی از حرکتهای مهم ، حرکت یك جسم باسرعت ثابت بر روی محیط دایره است . نمونه‌های بسیاری از این حرکت را هر روز مشاهده می‌کنیم . می‌توان گفت کـه حرکت ماه وبعضی ازماهواره‌ها به دور زمین نیز تقریباً از این نوع‌حرکت هستند . باید درنظرداشت که حرکت برمسیر دایره‌ای بادوران یك جسم به دوریك محورتفاوت دارد . مثلا وقتی که یك صفحه‌گرامافون می‌چرخد یك نقطه ازمحیط آن مسیر دایره‌ای نسبتاً بزرگی را به‌دور محور صفحه مـی‌پیماید ، درصورتی‌که خود صفحه بدون‌آن‌که ازجائی به‌جای دیگرمنتقل‌شود درجای خود می‌چرخد . درپاره‌ای ازموارد هردوی این‌حرکات باهم انجام می‌شوند مـانند چرخش زمین به‌دور محور خود و گردش آن بر مسیر تقریباً دایره‌ای به دور خورشید. در این بخش ما نخست این حرکت را مورد بحث قـرار می‌دهیم سپس قوانین کپلر را در مورد حرکت سیارات به دور خورشید بیان می‌کنیم و درپایان بخش نیروی جاذبه عمومی و اثـر آن را بر حرکت سیارات به دور خورشید و ماهواره‌ها به‌گرد زمین بررسی می‌نمائیم.

حرکت یکنواخت برمسیر دایره‌ای ـ وقتی که یك جسم کوچك ، یا به‌عبارت دیگر یك ذره بر مسیری به‌شکل دایره به‌دور یك‌نقطه ثابت حرکت مـی‌کند جهت تندی آن دائماً تغییرمی‌نماید ولی ممکن است اندازه تندی (یاسرعت)آن ثابت بماند .

اگر درحرکت برمسیردایره‌ای ، سرعت (یااندازه تندی) متحرك ثابت بماند چنین حرکتی را « حرکت یکنواخت برمسیر دایره‌ای » نامند.

حرکت یکنواخت برمسیردایره‌ای رامی‌توانیم به‌وسیله شعاع دایره مسیر وسرعت متحرك برروی

این دایره مجسم کنیم ، ولی اگر حرکت به‌طورمنظم تکرار شود می‌توانیم به‌جای این سرعت ، تعداد دورهای متحرك درواحد زمان ویا زمان لازم برای پیمودن یك دورکامل راکه اندازه‌گیری آنها آسانتر است درنظر بگیریم .

تعداد دورهای کاملی راکه متحرك درواحد زمان می‌زند تواتر یافرکانس حرکت می‌نامند و آن را به n نمایش می‌دهند .

$$\text{n} = \text{تعداد دورهای کامل در واحد زمان}$$

زمانی راکه طول می‌کشد تا متحرك یك دور کامل‌مسیرحرکت‌خود راپیماید پرید یا دوره حرکت می‌نامند وآن‌را به T نمایش می‌دهند .

$$\text{T} = \text{زمانی که متحرك یك دور کامل می‌زند}$$

به‌آسانی می‌توان پی برد کــه بین T و n رابطه‌های زیر برقرار است .

$$n = \frac{۱}{T} \quad \text{و} \quad T = \frac{۱}{n} \qquad (۱-۷)$$

پرید حرکت را مـی‌توان برحسب ثانیه ، دقیقه ، روز یا سال یا هرواحد زمان دیگر بیان کرد، درنتیجه فرکانس *نیز*برحسب دوربرثانیه ، بردقیقه، بر روز ویا برسال و... بیان می‌شود .

درجدول۷ـ۱حدود پرید وفرکانس چندمتحرك برای مقایسه داده شده است .

اگر در حرکت یکنواخت بر مسیر دایره‌ای ، R شعاع دایره مسیر و T پرید حرکت ، یا n عـده دورها درواحد زمان‌معلوم باشند ، v سرعت متحرك درهرنقطه ازمسیر به‌آسانی حساب می‌شود ، زیرا مسافتی‌که متحرك در زمان T می‌پیماید برابرمحیط دایره مسیر یعنی $۲\pi R$ است وچون :

جدول ۷-۱

مقایسه حدود پرید و فرکانس چند حرکت دایره‌ای (به‌اختلاف بین واحدها توجه کنید)

متحرك	پرید T	فرکانس n
الکترون دراتم هیدرژن طبق‌فرضیه بور	$۱۰^{-۱۷}$ ثانیه	$۱۰^{۱۷} \frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$
سانتریفوژ بسیار سریع (اولترا سانتریفوژ)	$۳/۳ \times ۱۰^{-۴}$ ثانیه	$۳۰۰۰ \frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$
توربین‌آبی برای تولید برق	۰/۳۳ ثانیه	$۳ \frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$
زمین به دور خود	۲۴ ساعت	$۷ \times ۱۰^{-۴} \frac{\text{دور}}{\text{دقیقه}}$
ماه به‌دورزمین	۲۷/۳ روز	$۱/۵ \times ۱۰^{-۳} \frac{\text{دور}}{\text{ساعت}}$
زمین به دورخورشید	۳۶۵/۲۵ روز	$۲/۱ \times ۱۰^{-۳} \frac{\text{دور}}{\text{روز}}$

$$\text{سرعت} = \frac{\text{مسافت طی شده}}{\text{زمان حرکت}}$$

بنابراین :

$$V = \frac{۲\pi R}{T} = ۲\pi R \,.\, n \qquad (۲-۷)$$

مثلا سرعت یك‌نقطه ازنوك ملخ یك‌هلیکوپتر به‌قطر ۷/۵۰متر به‌دور محورخودکه درشرایط‌عادی ۴۸۰ دور در دقیقه می‌زند برابراست با :

$$v = ۲\pi Rn = ۲ \times (۳/۱۴) \times (۳/۷۵) \times (۸/۰) \frac{m}{s}$$

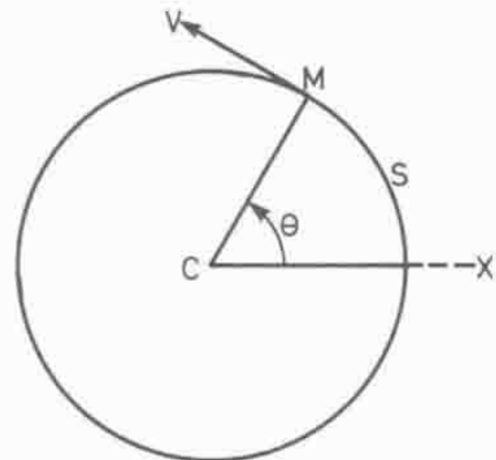
یا

$$v = ۱۸۹ \frac{m}{s}$$

بدیهی است اگر حرکت یکنواخت باشد v که از رابطهٔ (۷-۲) حساب می‌شود ، هم معرف تندی لحظه‌ای[1] وهم معرف سرعت متوسط است .

پرسش ۷-۱- اگر حرکت یکنواخت نباشد v معرف چه سرعتی است ؟

سرعت زاویه‌ای ــ درنظر بگیریم که متحرک M روی دایره‌ای به‌مرکز C وبه‌شعاع OM با سرعت ثابت حرکت می‌کند (شکل ۷-۱) سرعت زاویه‌ای این متحرک بنابه‌تعریف عبارت است از زاویه‌ای که در واحدزمان توسط شعاع CM پیموده‌می‌شود، به‌عبارت دیگر سرعت زاویه‌ای برابر زاویه مرکزی مقابل به قوسی از دایره است که متحرک آن را در واحدزمان می‌پیماید :



شکل ۷-۱- حرکت برمسیر دایره‌ای

$$\text{سرعت زاویه‌ای} = \frac{\text{زاویه پیموده شده}}{\text{زمان حرکت}}$$

اگر حرکت برمسیر دایره‌ای یکنواخت باشد سرعت زاویه‌ای نیز ثابت است .

سرعت زاویه‌ای را به ω (حروف لاتین با تلفظ امگا) نمایش می‌دهند . اگر θ زاویه پیموده شده در زمان t باشد داریم[2]:

$$\boxed{\omega = \frac{\theta}{t}} \qquad (۷-۳)$$

زاویه θ معمولا برحسب واحد « رادیان » با علامت اختصاری rad سنجیده می‌شود بنابراین سرعت زاویه‌ای برحسب واحد $\frac{\text{رادیان}}{\text{ثانیه}}$ $\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$ بیان می‌گردد .

رادیان چنان‌که می‌دانید اندازه زاویه‌مرکزی مقابل به‌قوسی از دایره است که طول آن برابر R شعاع دایره باشد. چون طول محیط دایره ۲π برابر شعاع آن است پس زاویه مقابل به‌تمام‌محیط دایره ۲π رادیان است و داریم .

$$۲\pi \text{ rad} = ۳۶۰^\circ$$

چون π = ۳/۱۴۱۵۹ است اندازه یک رادیان برحسب درجه برابر است با :

$$۱\text{rad} \doteq \frac{۳۶۰^\circ}{۲ \times ۳/۱۴۱۵۹} = ۵۷^\circ/۲۹۶ \simeq ۵۷^\circ/۳$$

بنابراین برای به‌دست‌آوردن اندازه یک‌زاویه برحسب رادیان کافی است طول قوس مقابل آن را برشعاع دایره تقسیم کنیم . یعنی :

$$\text{زاویه برحسب رادیان} = \frac{\text{طول قوس مقابل به‌زاویه}}{\text{طول شعاع دایره}}$$

۱ــ تندی لحظه‌ای بردایره مسیر درهرلحظه مماس است وسرعت خطی نیز نامیده می‌شود.

۲ــ رابطه ۷-۳ شباهت زیادی به رابطه $v = \frac{x}{t}$ درحرکت خطی دارد .

و یا

$$\theta_{(rad)}=\frac{S}{R} \qquad (۴-۷)$$

ازاین رابطه طول قوس پیموده شده در زمان t حساب می‌شود :

$$\boxed{S=R\theta} \qquad (۵-۷)$$

پرسش ۷-۲ ـ باتوجه به‌اینکه زاویه θ بدون دیمانسیون است دیمانسیون سرعت زاویه‌ای ω چیست؟

با استفاده از دورابطه $\omega=\frac{\theta}{t}$ و $S=R\theta$ می‌توان سرعت متحرك درهرنقطه از مسیرحرکت یا به‌عبارت دیگر « سرعت خطی » متحرك رابرحسب سرعت زاویه‌ای ω حساب کرد :

$$V=\frac{S}{t}=\frac{R\theta}{t}=R\frac{\theta}{t}$$

و یا

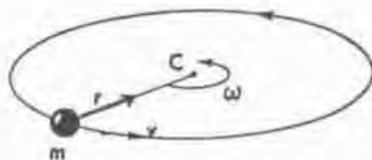
$$\boxed{V=R\omega} \qquad (۶-۷)$$

پرسش ۷-۳ ـ اگر در نظر بگیریم که سرعت لحظه‌ای مشتق مسافت طی شده نسبت به‌زمان‌است چگونه می‌توانیم باعمل مشتق گیری رابطه $V = R\omega$ را به‌دست‌آوریم ؟

ازمقایسه دو رابطه (۷-۲) و (۷-۶) نتیجه می‌شود:

$$\boxed{\omega=2\pi n=\frac{2\pi}{T}} \qquad (۷-۷)$$

شتاب و نیروی جانب مرکز ـ شکل ۷-۲ وزنه کوچکی را نشان می‌دهد که به‌انتهای ریسمانی بسته



شکل ۷-۲ـ وقتی که جرم m با سرعت ثابت روی یك دایره حرکت می‌کند شتابی پیدا می‌کندکه متوجه مرکز دایره است.

شده و درسطح افقی باسرعت ثابت برمسیر دایره‌ای حرکت می‌کند .

دراین حرکت سرعت (یا اندازه‌تندی) ثابت است ولی‌جهت‌آن دائماً تغییر می‌کند . درحرکتهای برخط راست باشتابهائی سروکار داشتیم که تنها از تغییر اندازه تندی حاصل می‌شدند ، ولی درحرکت یکنواخت برمسیردایره‌ای ، اندازه تندی ثابت‌است ولی جهت‌آن دائماً تغییرمـی‌کند . زیرا تندی یك کمیت برداری است‌که دارای جهت و اندازه است وهریك ازاین دوکه تغییرکند شتاب حاصل‌می‌شود. از طرف دیگر می‌دانیم برای ایجاد شتاب همواره نیروئی‌لازم است. دراین مثال‌نیروئی ازطرف‌ریسمان بروزنه وارد می‌شودکه اگر ازسنگینی وزنه و اثر مقاومت هوا برآن صرفنظرکنیم تنها نیروئی‌است‌که سبب تغییرجهت تندی وزنه می‌گردد و به‌آن شتاب می‌دهد . زیرا اگرریسمان ناگهان پاره شود وزنـه در راستای مماس بر دایره مسیر باتندی‌که درلحظهٔ پاره شدن ریسمان دارد به خارج پرتاب می‌گردد ، ولی تا وقتی‌که ریسمان وجود دارد نیروی‌کشش‌آن وزنه را مجبور می‌کند که برمسیر دایره‌ای بگردد . بردار نمـایش این نیرو همواره در راستای ریسمان قرار دارد بنابراین سوی آن درهرلحظه متوجه‌مرکز دایره مسیر است و به‌ایـن جهت نیروی جانب مرکز نامیده می‌شود . چون طبق قانون دوم نیوتن نیرو

و شتاب حاصل‌ازآن همواره هم‌جهت هستند، بردار نمایش شتاب حرکت نیز متوجه مرکز دایره مسیر است و بدین سبب «شتاب جانب مرکز» نامیده می‌شود .

پرسش ۷-۴ ـ با این که در حرکت برمسیر دایره‌ای نیرو و شتاب هردو متوجه مرکز دایره‌اند چرا جسم به‌طرف مرکزدایره کشیده نمی‌شود وروی محیط دایره به حرکت یکنواخت ادامه می‌دهد ؟

محاسبهٔشتاب جانب مرکز ـ درشکل (۷-۳ ـ الف) بردارهای تندی لحظه‌ای در دونقطه نزدیك به هم A و B نشان داده شده است .

اندازه این بردارها یکی است ولی‌جهت‌آنها تغییر کرده است . درنمودارهندسی شکل(۷-۳-ب) میزان تغییر تندی از A به B (ناشی‌ازتغییرجهت) با بردار $\overrightarrow{\Delta V}$ مشخص گردیده است . چون مثلث شکل (ب) مشابه مثلث ACB است (اضلاع آنها برهم عمودند) می‌توان نوشت :

$$\frac{\Delta v}{v}=\frac{\Delta x}{R}$$

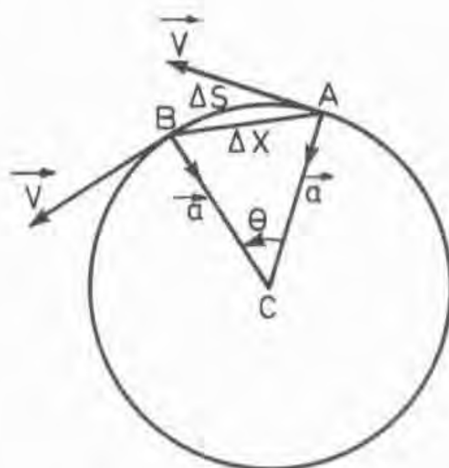
یا

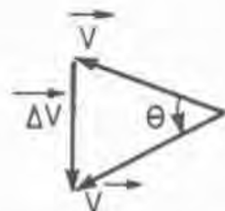
$$\Delta v=\frac{v}{R}\Delta x \qquad (\text{۷-۸})$$

اگر Δt مدت حرکت متحرك ازA به Bباشد با تقسیم دوطرف رابطهٔ ۷-۸ بر Δt نتیجه می‌شود.

$$\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{v}{R}\,\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

وقتی‌که زاویه θ کوچك و کوچکتر می‌شود طول وتر Δx به طول قوس $\widehat{AB}=\Delta S$ نزدیك و نزدیکتر می‌گردد وبردار $\Delta\overrightarrow{V}$ که راستای شتاب a





شکل ۷-۳- رسم هندسی برای محاسبه شتاب جانب مرکز

را مشخص می‌کند به امتداد عمود بر بردار $\overrightarrow{V}$ (در نقطه A) بسیار نزدیك می‌شود . درحد ، یعنی‌وقتی که $\Delta t \to 0$ میل‌می‌کند $\frac{\Delta v}{\Delta t}$به شتاب a و $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ به سرعت v (یعنی $\frac{\Delta s}{\Delta t}$) بسیار نزدیك می‌شود و می‌توان نوشت :

$$a=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{v}{R}\;\frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (\text{۷-۹})$$

و یا

$$\boxed{a=\frac{v^2}{R}} \qquad (\text{۷-۱۰})$$ شتاب‌جانب‌مرکز

اگرطبق رابطهٔ (۷-۶) ، $R\omega$ را بـه‌جای v بگذاریم اندازه شتاب جانب مرکز برحسب سرعت زاویه‌ای ω حساب می‌شود :

$$a=R\omega^2 \qquad (۷-۱۱)$$

پرسش ۷-۵ ــ اگرسرعت‌حرکت برروی‌دایره مسیر ثابت نباشد آیا علاوه برشتاب جانب مرکـز شتاب دیگری هم وجود خواهد داشت؟

اندازه نیروی جانب مرکز ــ نیروی جانب مرکز را باتوجه به‌آن‌چه گفته‌شد می‌توان چنین‌تعریف کرد:

نیروی جانب مرکز عبارتست ازنیروی ثابتی‌که به‌طور مداوم عمود برمسیر حرکت یك جسم برآن اثر می‌کند و سبب می‌شود که جسم با سرعت ثابت روی یك دایره حرکت نماید.

اندازه این‌نیرو طبق قانون دوم نیوتن‌ازرابطهٔ $F=ma$ حساب می‌شود یعنی :

$$F=m\frac{v^2}{R} \qquad (۷-۱۲)$$

و یا برحسب سرعت زاویه‌ای :

$$F=mR\omega^2 \qquad (۷-۱۳)$$

چندمثال :

۱- فرض‌کنید‌جرم‌وزنه‌m درشکل(۷-۲) برابر ۰/۵۰۰ کیلوگرم وشعاع دایره‌مسیر ۱/۰۰ متراست واین وزنه روی سطح افقی بدون اصطکاکی درهر ثانیه دو دورکامل می‌زند شتاب حرکت وزنـه و نیروی جانب مرکز وارد برآن را حساب کنید .

ــ شتاب جانب مرکز برابر است با :

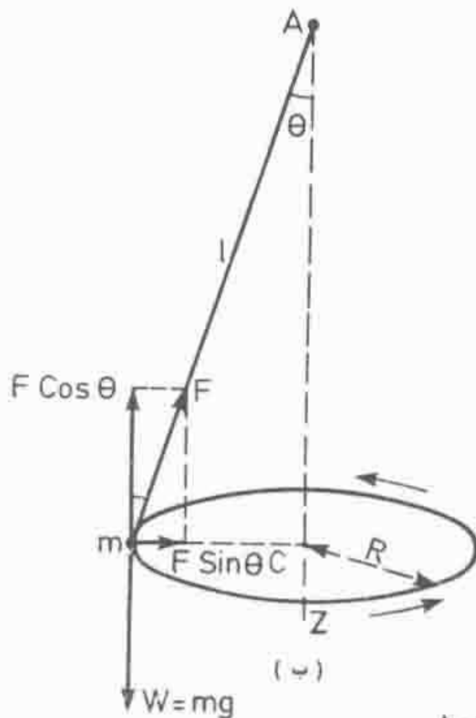
$$a=R\omega^2=R(2\pi n)^2=$$
$$1/00\,m\left(2\pi\times 2\frac{rad}{s}\right)^2=157/75\frac{m}{s^2}$$

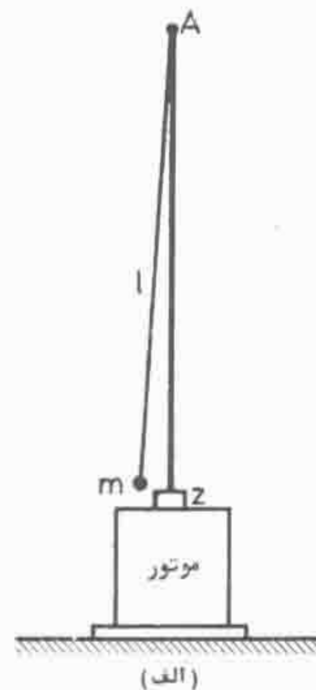
(رادیان بدون دیمانسیون است وبهمین‌جهت در واحد شتاب وارد نشده است)

ــ نیروی جانب‌مرکز(یاکشش ریسمان)برابر است با :

$$f=mR\omega^2=0/500\times 157/75\simeq 78/9N$$

۲- پاندول‌مخروطی ــ درشکل(۷-۳-الف)، یك‌گلوله‌کوچك فلزی به‌وسیلهٔ نخ محکم وسبکی‌که جرم آن درمقابل جرم‌گلوله ناچیز است مـانند یك پاندول در نقطه A به‌انتهای‌میلهٔ قائمی‌آویزان است ومیله روی موتورکوچکی‌نصب شده‌است . وقتی‌که موتور می‌چرخد میله‌رانیزمی‌چرخاند وبه‌ازاء سرعت زاویه معین ω ، پاندول از راستای‌قائم‌منحرف شده و همراه‌میله می‌چرخد. درنتیجه مرکزثقل‌گلوله‌برروی یك‌مسیردایره‌ای حرکت می‌کندونخ‌یك‌سطح مخروطی دوار به‌دورمحورAZ ایجاد می‌نماید. به‌همین‌جهت‌این دستگاه را «پاندول مخروطی»می‌نامند . هرچه‌سرعت زاویه ω بیشتر شود انحراف پاندول ازوضع‌قائم‌نیز بیشترمی‌شود واگرسرعت‌زاویه‌ای ω ثابت بماند، θ زاویهٔ انحراف پانـدول از وضـع قـائم نیز ثابت مـی‌ماند . شعاع دایره مسیر گلولـه در این حالت مطابق شکل(۷-۳ ــ ب)برابراست با $R=l\sin\theta$ (l طول پاندول یعنی فاصله نقطه A از مرکز ثقل گلوله است) . اگـر از مقاومت هوا صرفنظر کنیم نیروهای وارد برگلولـه عبارتند از : وزن گلوله





شکل ۷-۴ـ پاندول مخروطی

($w = mg$) ونیروی کشش نخ (F) .

اندازه همنه‌های نیروی F در دو راستای افقی وقائم به‌ترتیب $F\sin\theta$ و $F\cos\theta$ است . همنه افقی $F\sin\theta$ نیروی جانب مرکز است که سبب مـی‌شود گلوله باسرعت ثابت برروی مسیر دایره‌ای حرکت کند و داریم :

$$F\sin\theta = mR\omega^2 \qquad (۱۳-۷)$$

همنه قائم $F\cos\theta$ برابر وزن گلولـه است ، زیرا وقتی‌که θ ثابت است برآیند نیروها درراستای قائم صفر است و داریم :

$$F\cos\theta = mg \qquad (۱۴-۷)$$

اگر دو رابطه (۷-۱۳) و (۷-۱۴) را برهم تقسیم‌کنیم خواهیم داشت :

$$tg\theta = \frac{R\omega^2}{g} \qquad (۱۵-۷)$$

و با به‌کاربردن رابطهٔ $R = l\sin\theta$ نتیجه می‌شود :

$$\frac{1}{\cos\theta} = \frac{l\omega^2}{g} \qquad (۱۶-۷)$$

رابطهٔ(۷-۱۵) یا (۷-۱۶) بستگی بین‌زاویه θ وسرعت زاویه‌ای ω را نشان می‌دهد .

پرسش ۷-۶ ـ چگونه مـی‌توانید پرید ایـن حرکت ، یعنی زمان یك دورگردش آونگ‌راحساب کنید ؟

در مثالهای بالا ، چون جسم با سرعت ثابت برمسیر دایره‌ای حرکت مـی‌کند ممکن است تصور شودکه نیروی جانب مرکـز توسط نیروی دیگری مساوی با آن ولی درخلاف جهت آن به‌نام نیروی گریزاز مرکز خنثی می‌شود وهمین نیرو است‌که جسم را ازمرکزدوران دورمی‌کند. ولی درواقع‌نیروئی با این کیفیت وجود نداردوتصورآن‌بسته به دید ناظری

است که حرکت را مشاهده می‌کند . برای پی بردن به‌این مطلب فرض می‌کنیم ناظری در راستای محور AZ (شکل ۴-۷ ـ ب) ایستاده‌است وهمراه این‌محور با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد . این ناظر وزنه m را همواره ساکن می‌بیند . چون نیروی کشش نخ و همنه افقی آن ($mR\omega^2$) که متوجه مرکزاست برای این ناظرنیز وجود دارند واو می‌تواند آنهارا اندازه بگیرد ، برای توجیه حالت سکون ، نیروئی مساوی $mR\omega^2$ و در خلاف جهت آن بـه‌صورت « نیروی گریز ازمرکز» درنظرمی‌گیرد . اگرنخ قطع شود ، ازدید این ناظر، جسم در راستای شعاع دایره مسیر به‌خارج پرتاب می‌گردد .

ولی از دید ناظری‌که روی زمین ساکن است و این حرکت را مشاهده می‌کند نیروی گریز ازمرکز مفهومی ندارد زیرا جسم ، در اثرضربه‌ای‌که برآن وارد می‌شود و تندی‌که دراثر ضربه پیدا مـی‌کند می‌خواهد بنابه‌قانون ماند (اینرسی) درامتداد خط راست حرکت‌کند ولی‌نیروی جانب مرکزآنرا مجبور می‌کندکه برروی محیط دایره حرکت نماید . اگرنخ قطع شود جسم درراستای مماس بر مسیر به خارج پرتاب می‌شود .

نمونه‌های زیادی از حرکت برمسیر دایره‌ای وحرکت دورانی یافت می‌شودکه درآنهـا نیرو به صورت‌گریز ازمرکزظاهر می‌شود ، به‌ویژه هنگامی که نیروی جانب مرکز لازم وجود ندارد ازجمله :

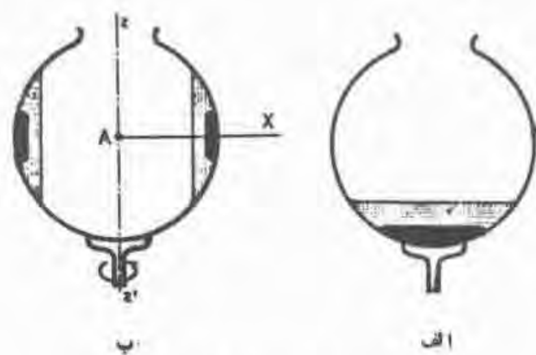
ـ گرفتن آب لباسهـا در ماشین لباسشوئـی (پس ازشستن لباس) دراثـر دوران سریـع مخزن شست‌وشوی لباس . (درجدار استوانه‌ای شکل این مخزن سوراخهای ریزی است‌که در موقع چرخیدن مخزن ، آب لباسها ازاین سوراخها خارج می‌شود.

ـ انحراف مسافر درون یك اتومبیل به‌طرف خارج پیچ جاده وقتی‌کـه اتومبیل در یك‌پیچ جاده حرکت می‌کند .

ـ برآمدگی زمین در استوا وپهن شدن‌آن در قطبین به‌سبب دوران زمین به‌دور محورفرضی‌که از قطبین آن مـی‌گذرد . اندازه‌گیریهای دقیق نشان می‌دهدکه قطر زمین دراستوا درحدود ۴۵ کیلومتر بزرگتر ازقطری است‌که از دوقطب زمین می‌گذرد.

ـ درشکل (۷-۵ ـ ب) ظرف محتوی آب و جیوه با سرعت زیاد به دورمحور قائم مـی‌چرخد . چون جرم حجمی جیوه ۱۳/۶ برابر جرم حجمی‌آب است نیروی اینرسی وارد بر جرم واحد حجم جیوه نیز ۱۳/۶ برابر نیروی اینرسی وارد بر جرم واحد حجم‌آب است. درنتیجه جیوه نسبت به‌آب ازمحور دوران بیشتر دور می‌شود . به‌عبارت دیگر، نیروی جانب مرکزکه ازطرف جدار ظرف برجرم واحدحجم جیوه وارد می‌شود بزرگتر ازنیروی‌جانب‌مرکزاست که برجرم حجمی‌آب وارد می‌گردد .

این پدیده اساس‌کار دستگاههای سانتریفوژ و



شکل ۷-۵ـ دوران سریع مایعات

الف ـ تعادل مایعات درحال‌سکون .
ب ـ تعادل درحال حرکت دورانی .

اولترا سانتریفوژ (سانتریفوژهای بسیار سریع) را تشکیل می‌دهد که توسط آنها می‌توان مواد مختلف با جرمهای حجمی متفاوت را که درحلالی حل‌شده‌اند ازیکدیگر جدا کرد .

۳- حرکت درپیچ جاده - وقتی کـه یك دوچرخه‌سوار یا یك موتور سوار درپیچ یك‌جاده با سرعت ثابت حرکت می‌کند ، در صورتی کـه سطح جاده افقی باشد نیروی جانب‌مرکزی که اورا برروی مسیر دایـره‌ای نگاه مـی‌دارد اصطکاك جانبی بین لاستیك چرخها وسطح جاده است . برای ایجاد ایـن اصطکاك ، دوچرخه‌سوار (یا موتورسوار) به‌طرف داخل پیچ کج می‌شود (شکل۷-۶) .

درنظر بگیریم که دوچرخه سواری دریك پیچ جاده مسیر دایره‌ای به‌شعاع R را باسرعت ثابت v می‌پیماید و راستای دوچرخه‌سوار بـا امتداد قـائم زاویه θ مـی‌سازد (شکل۷-۶ - الف) . نیروی عکس‌العمل زمین برلاستیك چرخها که آن‌را به $\vec{P}$ نمایش‌داده‌ایم با راستای قائم نیز زاویه θ می‌سازد .

همنه‌های این‌نیرو در دوراستای افقی‌وقائم به‌ترتیب عبارتند از $P\sin\theta$ و $P\cos\theta$ (شکل ۷-۶ - ب).

همنه افقی $F = P\sin\theta$ همان‌نیروی جانب‌مرکز است که سبب نگهداشتن دوچرخه سوار بر مسیر دایره‌ای می‌شود وطبق قانون دوم نیوتن‌داریم :

$$P\sin\theta = m\frac{v^2}{R}$$

همنه‌قائم $P\cos\theta$ در واقع عکس‌العمل نیروی وزن مجموعه دوچرخه و دوچرخه‌سواراست‌وداریم:

$$P\cos\theta = W = mg$$

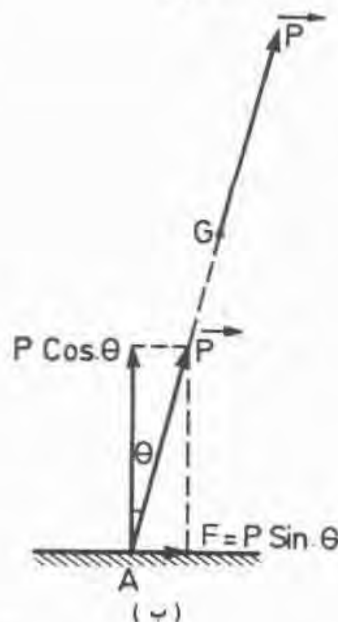
ازتقسیم این دو رابطه برهم نتیجه می‌شود :

$$tg\theta = \frac{v^2}{Rg} \qquad (۷-۱۶)$$

(این حرکت شبیه به‌حرکت پاندول‌مخروطی است وبرای این‌که وجه تشابه این دوحرکت‌آشکار شود نیروهای وارد برمتحرك را به وسیله بردار ، ازمرکزثقل G نمایش داده‌ایم) .

شکل ۷-۶- دوچرخه‌سوار در پیچ جاده به‌طرف داخل پیچ کج می‌شود .





رابطه(۷-۱۶) نشان می‌دهد که میزان کج‌شدن دوچرخه سوار از راستای قائم ، بستگی به سرعت حرکت وشعاع دایره‌مسیر دارد . هرچه‌سرعت بیشتر و شعاع دایره مسیر کوچکتر باشد زاویه θ بزرگتر است . مثلا اگر :

$$\text{v} = ۱۸\frac{\text{km}}{\text{h}} = ۵\frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{و} \quad \text{R} = ۱۰\text{m} \quad \text{باشد}$$

$$tg\theta = \frac{۵^۲}{۱۰ \times ۹/۸۰} \simeq ۰/۲۶$$

$$\text{و} \qquad \theta \simeq ۱۴/۵^\circ$$

باید درنظرداشت که زاویه انحراف θ محدود است ، زیرا نیروی اصطکاك جانبی که بستگی به وضعیت سطح جاده و لاستیکها دارد نمی‌تواند ازحد معینی تجاوزکند . درصورتی که اصطکاك سطح‌جاده به‌علت یخبندان یا عوامل‌دیگرخیلی کم شود، اندازه نیروی جانب مـرکزی نیز خیلی کم مـی‌گردد و دوچرخه‌سوار نمی‌تواند باسرعت درپیچ جاده بپیچد و در راستای مماس برمسیر سر می‌خورد و به‌خارج جاده پرتاب می‌شود .

مطالبی‌که در بالا گفته شد درباره حرکت یك اتومبیل یا یك‌ترن درپیچ جاده نیز صادق است . و برای این‌که تعادل این وسائط نقلیه در پیچهای تند جاده حفظ شود سطح جاده را بـه داخل پیچ شیب می‌دهند . زاویه شیب طبق‌رابطه ۷-۱۶ برای‌سرعت معینی درنظرگرفته می‌شود .



شکل ۷-۷ شیب عرضی جاده در یك میدان مخصوص مسابقات اتومبیل‌رانی .

شکل۷-۷ شیب عرضی جاده‌ای‌راکه دریکی ازمیدانهای مخصوص مسابقات اتومبیل‌رانی درست شده است نشان می‌دهد .

حرکت سیاره‌ها و قوانین کپلر

کپلر[۱] ستاره‌شناس آلمانی بر اساس مشاهدات کپرنیك[۲] وتیکوبراهه[۳] واندازه‌گیریهای دقیقی کـه خود روی مدارهای حرکت سیاره‌ها به دورخورشید انجام‌داد نتایج انـدازه‌گیری خود را به صورت سه‌قانون تجربی کـه به‌نام « قوانین کپلر » معروف شده‌اند چنین بیان‌کرد :

قانون اول ــ هرسیاره به دور خورشید مسیر بیضی شکلی را می‌پیماید که خورشید در یکـی از کانونهای آن بیضی است (شکل۷-۸).

۱ــ Johannes Kepler (۱۵۷۱-۱۶۳۰ میلادی)

۲- Nicolaus Copernicus (۱۴۷۳-۱۵۴۳ میلادی) دانشمند ومنجم لهستانی‌که برخلاف نظر متقدمین اظهارداشت زمین مانند سیاره‌های دیگر به‌گرد خورشید می‌گردد .

۳- Tycho Brahe (۱۵۴۶-۱۶۰۱) ستاره‌شناس دانمارکی .

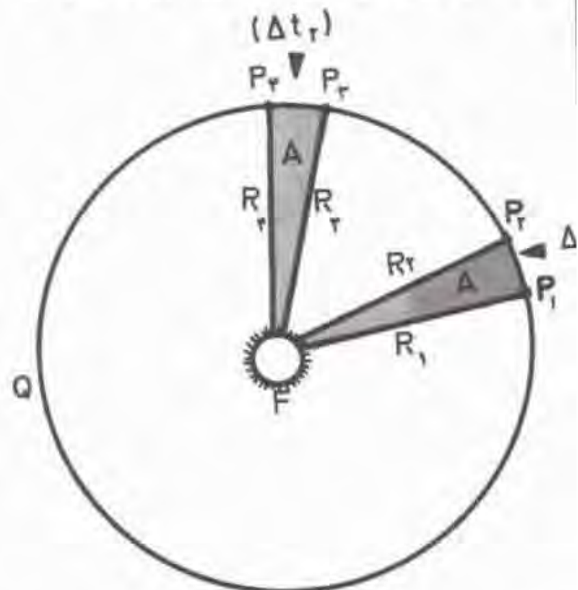
قانون دوم ــ شعاع حامل هرسیاره (یعنی خط واصل بین سیاره وخورشید) در زمانهای مساوی سطحهای مساوی طی می کند .

بنابراین در شکل (۷ــ۸) اگر زمانهای Δt_1 و Δt_2 برابر باشند سطح A_1 مساوی سطح A_2 است.

قانون سوم ــ مجذور پرید حرکت سیاره متناسب با توان سوم فاصله متوسط آن سیاره از خورشید است یعنی :

$$T^2 \propto R^3$$

برای این که بحث دربارهٔ قانون سوم کپلر را از نظر کاربرد محاسبات ریاضی آسانتر کنیم فرض میکنیم که مدارهای گردش سیارهها بهدور خورشید دایرهای شکل هستند . این فرض چندان دوراز واقعیت نیست ، زیرا مدار بیشتر سیارهها تقریباً به شکل دایره است مثلاًمدار گردش مریخ بهدورخورشید کمتر از نیم درصد نسبت بهدایره انحراف دارد .



شکل ۷ــ۸ــ نمودار سادهای از قانونهای اول و دوم کپلر . خورشید دریکی از کانونهای مدار بیضی شکل است که خیلی بهدایره نزدیك است . سطحهای A_1 و A_2 که در زمانهای با هم مساوی Δt_1 و Δt_2 توسط شعاع حامل R پیموده میشوند با هم برابرند . نزدیکترین وضع سیاره بهخورشید (یا نقطه حضیض سیاره) به Q نمایش داده شده است .

بنابراین برای هرسیاره مداری بهشعاع R در نظر می گیریم که خورشید درمرکزآن قرار دارد و با این فرض قانون سوم کپلررا بهصورت زیرمی نویسیم:

$$\frac{T^2}{R^3} = k \quad \text{مقدار ثابت}$$

اگرمقادیر R و T برای هرسیاره اندازگیری و دراین رابطه گذارده شود مقدار ثابت k بدست میآید .

k برای همهٔ سیارهها یکی است ، بنابراین اندازهآن بستگی بهویژگیهای سیارهها مانند جرم ، شعاع مدار ، پرید و .... که برای سیارههای مختلف متفاوتند ندارد و فقط تابع جاذبهٔ خورشید است به اینجهت در معادلات بعد ، آن را به $k_{\text{خ}}$ نمایش خواهیم داد .

جاذبه بین خورشید وسیارهها ــ نیوتن ازقوانین کپلر و از قانونهای حرکت که خودش آنها را وضع کرده بود نتیجه گرفت که درجهان اجسام ، دو به دو یکدیگر را بانیروی جاذبه جذب می کنند و با یك استدلال منطقی قانون جاذبه عمومی را پایه گذاری کرد . برای این که به استدلال نیوتن در مرحله پایه گذاری قانون جاذبه عمومی پی ببریم حرکت زمین بهدورخورشید را درنظر می گیریم :

چون مسیرحرکت زمین بهدورخورشید بیضی خیلی نزدیك بهدایرهاست میتوان گفت که زمینتحت

اثر نیروی جانب مرکزی است که اندازهٔ آن از رابطه زیر حساب می‌شود .

$$F=M_e\frac{v^2}{R}=M_e\omega^2R$$

که درآن :

$M_e=$ جرم زمین

$\omega=$ سرعت زاویه‌ای حرکت زمین به‌دور خورشید

$v=$ سرعت خطی حرکت زمین برمدار

$R=$ شعاع مدار زمین به‌دور خورشید

درصورتی که مدار را دایرهٔ کامل درنظر بگیریم طبق قانون دوم کپلر ω مقدار ثابتی خواهدبود (زیرا شعاع حامل زمین در زمانهای مساوی سطحهای مساوی طی می‌کند). چون $\omega=\frac{2\pi}{T}$ است داریم :

$$F=M_e\frac{4\pi^2}{T^2}R$$

و با توجه به‌قانون سوم کپلر خواهیم داشت (طرف راست این رابطه را یک‌بار در R^2 ضرب و یک‌بار برآن تقسیم می‌کنیم) .

$$F=M_e\frac{4\pi^2}{R^2}\cdot\frac{R^3}{T^2}$$

و یا $$F=\frac{M_e}{k_s}\cdot\frac{4\pi^2}{R^2}$$

این‌رابطه نشان می‌دهدکه نیروی جاذبه بین‌خورشید و زمین متناسب بـا عکس مجـذور فاصله زمین از خورشید است .

نیوتن پی‌برده بودکه نیروی جاذبهٔ بین ماه و زمین ازقانون « نیرومتناسب باعکس‌مجذور فاصله » پیروی می‌کند وما استدلال جالب او را در زیر بیان می‌کنیم :

شعاع مدارحرکت ماه به‌دور زمین (که‌آن را به R_m نمایش می‌دهیم) برابر $3/84\times10^8$متر و سرعت زاویه‌ای حرکت‌آن برابر :

$$\omega_m=\frac{2\pi \text{ رادیان}}{27/3 \text{ روز}}=\frac{2\pi}{2/36\times10^6}\ \frac{rad}{s}$$ است

پس شتاب جانب‌مرکزحرکت ماه به دورزمین برابر است با :

$$a=\omega^2_mR_m=\frac{4\pi^2}{(2/36\times10^6)^2}\times$$
$$(3/84\times10^8)\simeq2/72\times10^{-3}\frac{m}{s^2}$$

نسبت این‌شتاب به g (شتاب سقوط‌آزاداجسام درسطح زمین) برابر است‌با :

$$\frac{a}{g}=\frac{2/72\times10^{-3}\frac{m}{s^2}}{9/80\frac{m}{s^2}}\simeq2/78\times$$
$$10\simeq\frac{1}{3600}=\frac{1}{60^2}$$

بنابراین نسبت وزن ماه درمدار خود به‌وزن آن اگر روی سطح زمین قرارداشت نیزبرابر $\frac{1}{60^2}$ است. ازطرف دیگرشعاع مدارماه (R_m) ، ۶۰ برابر شعاع‌کره زمین است . جسمی‌که درسطح زمین قرار دارد و در این‌جا شتابش g است فاصله‌اش از مرکز زمین برابرشعاع‌کره زمین است . ماه‌که فاصله‌اش از زمین ۶۰ برابرشعاع‌کره زمین‌است دارای شتاب $\frac{g}{60^2}$ است، استنباط نیوتن‌این‌است‌که *نیروی مسبب وزن*، یعنی‌نیروی جاذبه متناسب‌باعکس مجذورفاصله است. معادلهٔ $F=\frac{M_e}{k_s}\cdot\frac{4\pi^2}{R^2}$ نیز قانون تناسب نیرو با عکس مجذورفاصله را درمنظومه شمسی نشان‌می‌دهد. این معادله همچنین نشان می‌دهدکه نیروی وارد از خورشید بر زمین متناسب با M_e جرم زمین است .

زمین‌هم‌بنابه قانون عمل‌وعکس‌العمل نیروئی

مانند F' برخورشید وارد می‌سازد که اندازه‌آن برابر اندازه نیروی خورشید برزمین است و از رابطه‌ای مانند رابطهٔ بالا به دست می‌آید با این تفاوت که باید به‌جای M_e (جرم‌زمین) M_s جرم خورشید و به‌جای k_s (ضریب ویژگی‌خورشید) k_e ضریب ثابت‌دیگری که ویژهٔ زمین است قرارداده شود بنابراین :

$$F' = \frac{M_s}{k_e} \cdot \frac{4\pi^2}{R^2}$$

چون $F' = F$ است پس :

$$\frac{M_e}{k_s} \cdot \frac{4\pi^2}{R^2} = \frac{M_s}{k_e} \cdot \frac{4\pi^2}{R^2}$$

یا

$$\frac{M_e}{k_s} = \frac{M_s}{k_e}$$

و یا

$$M_e k_e = M_s k_s$$

اگر نظیر این استدلال را برای هرسیاره دیگر (که آن را باعلامت P مشخص می‌کنیم) به کار بریم خواهیم داشت:

$$M_p k_p = M_s k_s$$

بنابراین $M_s k_s$ یك «ثابت جهانی» درمنظومهٔ شمسی است که بستگی به‌ویژگیهای یك سیاره خاص ندارد . برای حذف $4\pi^2$ ازروابط بالا بهتر این‌است $M_s k_s$ را به‌صورت زیر بنویسیم :

$$M_s k_s = \frac{4\pi^2}{G}$$

کـه درآن G ، یك ثابت جهانی دیگـر ، برابر $G = \frac{4\pi^2}{M_s k_s}$ است. بنابراین‌رابطهٔ $F = \frac{M_e}{k_s} \cdot \frac{4\pi^2}{R^2}$ به صورت زیر درمی‌آید :

$$F = M_e \frac{4\pi^2}{R^2} \cdot \frac{M_s \cdot G}{4\pi^2} = G \frac{M_e M_s}{R^2}$$

$$F = G \frac{M_e M_s}{R^2}$$

F نیروی جاذبهٔ متقابلی است که از خورشید برزمین ، یا از زمین برخورشید وارد مـی‌شود این نیرو باجرمهای خورشید و زمین نسبت مستقیم و با مجذور فاصله زمین ازخورشید نسبت معکوس دارد.

قانون جاذبهٔ عمومی نیوتن

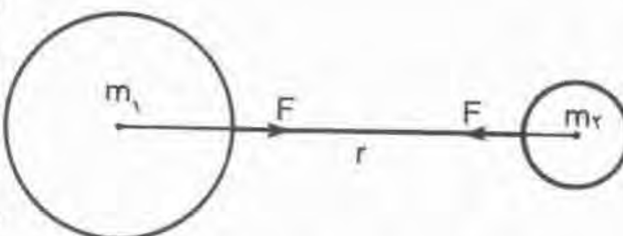
مشهوراست که‌نیوتن ازافتادن سیب از درخت الهام گـرفت و قانون جاذبهٔ عمومی را پایه‌گذاری کـرد . نیوتن نخست پی‌برد که نیرویی که براشیاء مجاور زمین وارد می‌شود وسبب سقوط آنها می‌گردد از نوع همان نیروئی است‌که درمنظومه شمسی بین خـورشید و سیاره‌ها وجود دارد ، سپس نظر خود را تعمیم داد و قانون جاذبهٔ عمومی را به صورت زیر بیان کرد :

هردو جسم یکدیگر را با نیروئی جذب می‌کنند که با حاصل ضرب جرمهای آنها نسبت مستقیم و با مجذور فاصلهٔ آنها از هم نسبت معکوس دارد.

مثلا اگر دو جسم به‌جرمهای m_1 و m_2 به فاصله r از یکدیگر قرارگرفته باشند (شکل ۷-۹) قانون جاذبهٔ عمومی دربارهٔ آنها به‌صورت زیرنوشته می‌شود.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (17\text{-}7)$$

ضریب ثابت G کـه « ثابت جهانی جاذبه » نامیده می‌شود بستگـی به واحدهـای انتخاب شده دارد: اگر F برحسب نیوتن و m_1 و m_2 برحسب



شکل ۷-۹ نیروی جاذبه‌ای که دوجسم برهم وارد می‌سازند باجرمهای آنها نسبت مستقیم و بامجذور فاصله آنها ازهم نسبت معکوس‌دارد.

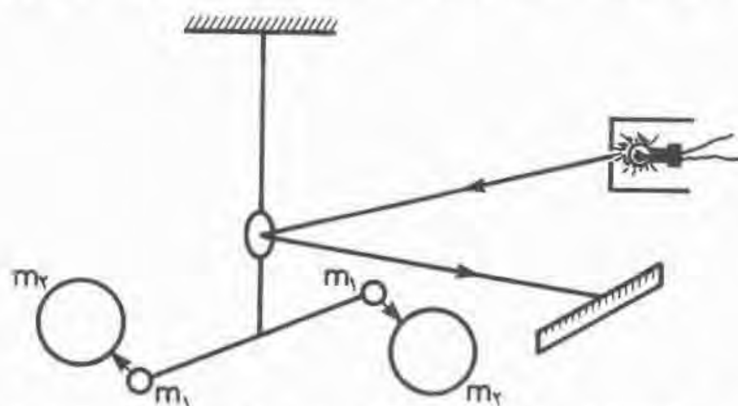
کیلوگرم و r برحسب متر باشد اندازه G تا چهار رقم معنی‌دار برابر است با :

$$G = ۶/۶۷۳ \times ۱۰^{-۱۱} \frac{N.m^۲}{kg^۲}$$

پرسش ۷-۷- به‌نظر شما آیا رابطهٔ (۷-۱۷) درمورد هردوجسم به‌هرشکل‌که باشند صادق است؟

پس‌ازآن که‌نیوتن قانون‌جاذبه‌عمومی را کشف کرد دانشمند دیگری به نام هنری‌کاوندیش (۱) با آزمایشی دقیق ومشکل موفق شد G را معین‌کند.

آزمایش کاوندیش - شکل (۷-۱۰) طرح ساده‌ای از اسبابی را که کاوندیش برای تعیین G به‌کار برد نشان می‌دهد . این اسباب تشکیل شده است از یك میلهٔ دراز و سبك که دوگلوله کوچك یکسان هریك به جرم $m_۱$ به دو سر آن متصل است و میله از وسط توسط یك نوار باریك ونرم (ازجنس‌کوارتز) به‌طور افقی آویزان است. دو وزنه بزرگ وکروی شکل یکسان، هریك به‌جرم $m_۲$ را می‌توان مطابق شکل به جرمهای $m_۱$ نزدیك‌کرد. نیروهای جاذبه موجود بین جرمهای بزرگ وکوچك، یك‌جفت‌نیرو (دونیروی‌مساوی وموازی ومختلف‌الجهت) تشکیل می‌دهند کـه سبب می‌شود دستگاه حول محور قائم کمی بچرخد. روی نوارآینه‌کوچکی نصب شده‌است و بازتابش پرتو نوری‌که به این‌آینه می‌تابد برروی درجات یك صفحهٔ مدرج اندکی جابجا می‌شود . این جابجائی توسط یك دوربین‌کوچك به‌دقت اندازه‌گیری و زاویه چرخش میله معین می‌شود. با تعیین زاویه چرخش و اندازه‌گیری تاب نوار ، نیروی F معین



شکل ۷-۱۰ طرح ساده دستگاه‌کاوندیش برای تحقیق درقانون جاذبهٔ عمومی نیوتن

۱- Henry Cavendish (۱۸۱۰ - ۱۷۳۱ میلادی) فیزیکدان و شیمیدان انگلیسی. این آزمایش درسالهای ۱۷۹۷ و ۱۷۹۸ میلادی انجام شده است.

می‌گردد و چون جرمهای m_1 و m_2 و فاصله آنها از یکدیگر معلوم است اندازه G حساب می‌شود .

مواردکاربرد قانون جاذبه عمومی

مواردکاربرد قانون جاذبهٔ عمومی بسیاراست و دراین جا ما فقط به چند مورد اشاره می‌کنیم .

۱ ـ قانون جاذبه ـ شدت میدان جاذبه ـ مفهوم میدان جـاذبه را می‌توان از قانون جـاذبه عمومی استنباط‌کرد : درشکل (۷-۱۱) جسم بزرگی به‌جرم



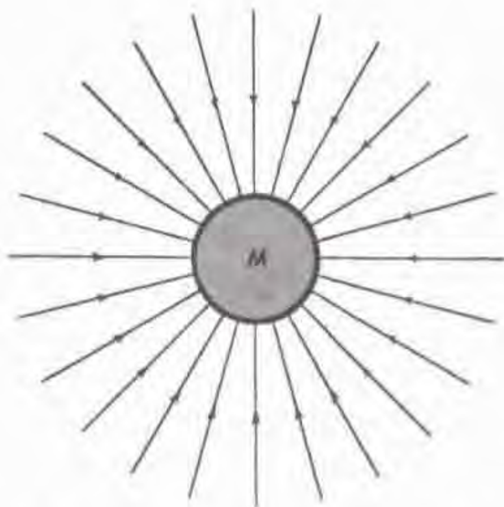
شکل ۷-۱۱ـ نیروی جاذبه بین دوجسم نیروی کششی است که از فاصله اعمال می‌شود

M نشان داده شده است که جسم کوچکی به‌جرم m را ازفاصله r بانیروی جاذبهٔ F جذب می‌کند. اندازه نیروی F طبق قانون جاذبه عمومی از ایـن رابطه حساب می‌شود :

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

با وجود این‌که دو جسم باهم درتماس نیستند و بین آنها فاصله موجـود است ایـن نیرو اعمال می‌شود . برای توجیه علت اثر این نیرو در اطراف جسم میدان جاذبه درنظر گرفته می‌شود .

میدان جاذبه بنابه‌تعریف، عبارتست ازفضائی که در آن فضا اثرهای نیروی جاذبه وجود دارد . میدان‌جاذبه، مانند میدان‌الکتریکی ، باخطوط میدان



شکل ۷-۱۲ خطوط میدان جاذبه در اطراف یك جسم‌کروی شعاعی ومتوجه مرکز‌کره‌اند

نمایش داده می‌شود . شکل (۷-۱۲) خطوط میدان جاذبه را دراطراف یك‌جسم کروی شکل همگن نشان می‌دهد و جهت میدان همواره متوجه مرکز جسم است .

شدت میدان جاذبه ـ شدت میدان‌درهرنقطه ازیك‌میدان‌جاذبه‌عبارتست‌ازنیروئی که برواحدجرم‌واقع درآن نقطه وارد می‌شود وبرحسب واحد $\frac{\text{نیوتن}}{\text{کیلوگرم}}$ بیان می‌گردد . مثلا شدت میدان جـاذبه زمین در نقطه‌ای واقع برسطح زمین، به‌فرض این‌که‌تمام‌جرم زمین را درمرکز آن متمرکزفرض‌کنیم برابراست با:

$$g = \frac{F}{m} = G\frac{M_e}{R_e^2} \qquad (۷\text{-}۱۸)$$

M_e جرم زمین و R_e شعاع آن است .

رابطهٔ (۷-۱۸) نشان می‌دهدکه شدت میدان جاذبهٔ زمین بستگی به‌جرم جسمی‌که درمیدان قرار

می‌گیرد ندارد بلکه تابع جرم و شعاع زمین است . شدت میدان جاذبه زمین در تمام نقاطی که از مرکز زمین به‌یك‌فاصله هستند یکسان است واگراین فاصله تغییرکند شدت میدان نیز تغییر می‌کند.

نیروئی که در این میدان برجسمی به‌جرم m وارد می‌شود برابر mg یعنی وزن جسم است :

$$\boxed{F=G\frac{M_e}{R_e^2}\cdot m=mg} \qquad (۱۹-۷)$$

بدیهی‌است‌جسم‌تحت اثراین نیرو، به‌طورآزاد در راستای خطوط میدان باشتاب g سقوط می‌کند ، بنابراین‌اندازه‌شتاب حاصل از نیروی جاذبه درهرنقطه ازمیدان برابر اندازه شدت میدان جاذبه درآن نقطه است .

پرسش ۸-۷ ـ نشان دهیدکه دیمانسیون شدت میدان جاذبه و شتاب درمیدان جاذبه یکی است.

۲ـ محاسبهٔ جرم زمین. اگر رابطه (۱۸-۷) را به صورت :

$$M_e=\frac{g}{G}R_e^2$$

بنویسیم با اندازه‌گیری g (شتاب جاذبه) و R_e (شعاع متوسط زمین) ، M_e جرم زمین حساب می‌شود. به‌ازای :

$$G=۶/۶۷۳\times۱۰^{-۱۱}\frac{N.m^2}{kg^2} \text{ و } g=۹/۸۰\frac{N}{kg}$$

و $R_e=۶۳۷۰^{km}=۶/۳۷۰\times۱۰^۶m$ خواهیم داشت:

$$M_e=\frac{۹/۸۰\left(\frac{N}{kg}\right)}{۶/۶۷۳\times۱۰^{-۱۱}\left(\frac{N.m^2}{kg^2}\right)}\times(۶/۳۷\times۱۰^۶m)^2\approx۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}kg$$

اگرحجم زمین را از رابطهٔ $V=\frac{۴}{۳}\pi R_e^3$ حساب کرده جرم زمین را برحجم آن تقسیم‌کنیم جرم حجمی متوسط زمین درحدود $۵۴۰۰\frac{kg}{m^3}$ یا $۵/۴\frac{g}{cm^3}$ به‌دست می‌آید.

جرم حجمی متوسط بیشترسنگهای موجود در سطح زمین درحدود $۲۷۰۰\frac{kg}{m^3}$ یا $۲/۷\frac{g}{cm^3}$ است با توجه به جرم حجمی متوسط زمین $\left(۵۴۰۰\frac{kg}{m^3}\right)$ چنین‌استنباط می‌شودکه جرم‌حجمی متوسط مواد درون زمین باید بین ۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{مترمکعب}}$ باشد. این مطلب دور از واقعیت نیست، زیرا جرم حجمی فلزات درون زمین در همین حدود است و درنتیجه جرم $۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}kg$ برای زمین منطقی به نظر می‌رسد.

۳ـ حرکت ماهواره‌ها به‌دور زمین ـ ماهواره‌ها به‌گرد زمین مدارهای بیضی‌شکلی می‌پیمایند که‌بعضی از آنها به دایره خیلی نزدیکند . در این جا از نظر سادگی محاسبه مدارماهواره را دایره درنظرمی‌گیریم وسرعت حرکت ماهواره و زمان‌گردش یك دورکامل آن را حساب می‌کنیم.

نیروئی که‌ماهواره را درمدارخود نگاه می‌دارد نیروی جاذبه زمین است واین نیرو بنا به‌قانون دوم نیوتن به‌ماهواره شتاب جانب مرکزی می‌دهدکه در رابطه زیر صادق است :

$$F=G\frac{mM_e}{r^2}=m\frac{v^2}{r}$$

که در آن v سرعت حرکت ماهواره در روی مدار

خود و r شعاع مدار و m جرم ماهواره است . از این رابطه سرعت حرکت ماهواره حساب می‌شود.

$$v=\sqrt{\frac{GM_e}{r}} \qquad (۲۰-۷)$$

از رابطه (۷-۱۸) نتیجه می‌شود

$$GM_e=gR_e^۲$$

و از مقایسه این رابطه با رابطهٔ (۷-۲۰) نتیجه می‌شود :

$$v=\sqrt{\frac{gR_e^۲}{r}}$$

و یا :

$$v=R_e\sqrt{\frac{g}{r}} \qquad (۲۱-۷)$$

پرید حرکت ماهواره، یعنی زمان لازم برای یك دور کامل گردش به‌گرد زمین برابر است با :

$$T=\frac{۲\pi r}{v} \qquad (۲۲-۷)$$

هرچه شعاع مدار ماهواره بزرگتر باشد سرعت آن کوچکتر و پرید حرکت آن بزرگتر است .

مثال – یك ماهواره مخابراتی درفاصله ۹۰۰ کیلومتری سطح زمین روی‌یك مدار دایره‌ای شکل به‌گرد زمین می‌گردد. سرعت ماهواره وپرید حرکت آن را حساب کنید . شعاع متوسط زمین ۶۳۷۰ کیلومتر است.

– سرعت حرکت ماهواره برابر است با [۱] :

$$v=R_e\sqrt{\frac{g}{r}}$$

به ازاء $R_e=۶۳۷۰^{km}=۶/۳۷\times ۱۰^۶m$

و $g=۹/۸۰\ \frac{m}{s^۲}$

$r=۶۳۷۰+۹۰۰=۷۲۷۰^{km}=۷/۲۷\times ۱۰^۶m$

داریم :

$$v=۶/۳۷\times ۱۰^۶m\sqrt{\frac{۹/۸۰\left(\frac{m}{s^۲}\right)}{۷/۲۷\times ۱۰^۶(m)}}$$

$$\approx ۷/۴۱\times ۱۰^۳\frac{m}{s}=۷/۴۱\frac{km}{s}$$

پرید حرکت ماهواره برابر است با :

$$T=\frac{۲\pi r}{v}=\frac{۲\times ۳/۱۴\times ۷/۲۷\times ۱۰^۶(m)}{۷/۴۱\times ۱۰^۳\left(\frac{m}{s}\right)}$$

$$\approx ۶۱۶۱\ \text{ثانیه}\approx ۱۰۳\ \text{دقیقه}$$

رابطه (۷-۲۱) نشان می‌دهد که سرعت حرکت ماهواره به‌جرم آن بستگی ندارد، در نتیجه هرجسم (جرم آن هرچه باشد) وقتی‌که باسرعت v برروی مداری به‌شعاع r به‌گرد زمین می‌گردد شعاع مدار وسرعت آن همواره ثابت می‌ماند. به‌همین جهت اگر یك فضا نورد درسفینهٔ فضائی خود جسمی، مثلا یك لیوان آب را جلو دهان خود رهاکند لیوان از نظر اوهمان جامی‌ماند ومی‌تواندآب را بیاشامد. هم‌چنین

۱– چون جرم زمین (M_e) و ثابت جهانی جاذبه (G) معلوم است سرعت v را می‌توان مستقیماً از رابطه (۷-۲۰) نیز حساب کرد.

فضانورد درون کپسول خود در حال بی‌وزنی معلق می‌ماند.(۱)

خودتان آزمایش کنید

با انجام آزمایش زیر می‌توانید پی ببرید که چگونه نیروی جانب مرکز، بستگی به جرم و سرعت جسم و فاصله آن از مرکز دایره مسیر دارد:

لوله شیشه‌ای به طول تقریبی ۲۰ سانتیمتر را که هر دو سر آن باز است انتخاب کنید و اگر دو سر آن ناصاف و برنده است روی شعله بگیرید تا صاف شود. قطعه نخی به طول تقریباً یك متر را از آن بگذرانید و به یك سر این نخ گلوله کوچکی مانند یك ساچمه را که جرم آن معلوم است (مثلا ۵ گرم) ببندید (در صورتی که گلوله جا برای بستن نخ ندارد می‌توانید آن را در یك قطعه کوچك نایلون بگذارید و اطراف نایلون را جمع کنید و نخ را به نایلون ببندید). به سر دیگر نخ وزنه بزرگتری بیاویزید (یا نیروسنجی به بندید). روی نخ، درفاصله معینی از مرکز گلوله (مثلا ۳۰ سانتیمتر) نشانه‌ای با جوهر بگذارید. لوله شیشه‌ای‌را درراستای قائم نگاهدارید وبه‌وسیله‌آن گلوله رابالای سرخود درسطح افقی بگردانید. تعداد دورها را طوری تنظیم کنید تا نشانه روی نخ درست برلبه بالائی لوله قرارگیرد (دراین حالت شعاع دایره مسیر معلوم ومثلا ۳۰ سانتیمتر است) ودرحالتی‌که شعاع دایره مسیرثابت است تعداد دورهای گلوله را طوری تنظیم کنید تا سنگینی وزنه آویخته شده با نیروی کشش نخ برابر شود و وزنه به حال تعادل قرارگیرد (یااگراز نیروسنج‌استفاده کرده‌اید نیروی ثابتی را نشان دهد). تعداد دورهای کامل گلوله را درمدت ۱۰ ثانیه بشمارید وپرید حرکت

۱ـ اگر مدار ماهواره بیضی باشد سرعت حرکت ماهواره در روی مدار ثابت نیست، ماهواره در نقطه حضیض (یعنی در نزدیکترین فاصله خود از زمین) بیشترین مقدار سرعت و درنقطه اوج (یعنی دورترین فاصله خود از زمین) کمترین مقدار سرعت خود را دارا خواهد بود. معادله سرعت حرکت برمدار بیضی معادلهٔ پیچیده‌ای است ولی درنقاط اوج و حضیض، سرعت از روابط زیرحساب می‌شود:

درنقطه اوج $V_{min}=\sqrt{\frac{GM_e}{a}\left(\frac{۱-e}{۱+e}\right)}$ درنقطه حضیض $V_{Max}=\sqrt{\frac{GM_e}{a}\left(\frac{۱+e}{۱-e}\right)}$

a نصف قطر بزرگتر بیضی و e خروج از مرکز بیضی است‌که از رابطهٔ $e=\sqrt{\frac{a^{۲}-b^{۲}}{a^{۲}}}$ حساب می‌شود (b نصف قطرکوچکتر بیضی است)

آن را معین کنید . چـون سنگینی وزنه (یا نیروئی کـه نیروسنج نشان می‌دهد) برابر نیروی جانب مرکز است درستی رابطهٔ زیررا می‌توانید تحقیق کنید .

$$F = mr.\frac{4\pi^2}{T^2}$$

m جرم گلوله ، r شعاع دایره مسیر ، T پر ید حرکت گلوله و F برابرسنگینی وزنه‌ای است که به سر دیگر نخ آویخته شده است (ویا نیروی ثابتی است که نیروسنج نشان می‌دهد) . در صورتی‌که از نیروسنج استفاده می‌کنید مواظب باشید که در اثر باز شدن فنر نیروسنج، شعاع دایره‌مسیر تغییر نکند وبرای این منظورنیروسنج را پائین بیاورید.

جـرم m و شعاع r و پرید T را جداگانه تغییر دهید و اثر هر یك را در میزان تغییر نیروی جـانب مرکز بررسی کنید . سعی کنید لوله شیشه‌ای تا جائی کـه ممکن است حرکت کوچکی داشته باشد تا شعاع دایره مسیر تقریباً ثابت بماند . بهتر این است که این آزمایش را به صورت گروهی انجام دهید .

به این پرسشها پاسخ دهید :

۱) ــ در حرکت یکنواخت بر مسیر دایــره‌ای چرا بـا آن کـه سرعت ثابت است شتاب وجود دارد ؟

۲) ــ اگــر حرکت برمسیر دایــره‌ای یکنواخت نباشد آیا شتاب جـانب مرکز وجـود دارد ؟ درصورتی‌که جواب مثبت است آیا شتاب دیگری هم وجود دارد ؟ توضیح دهید .

۳) ــ چرا نیروی جـانب مرکــز لازم است تـا جسمی بر مسیر دایــره‌ای حرکت کند ؟ نیروی گریز از مرکز چیست ؟ آیا ممکن است بدون نیروی جانب مرکز نیروی گریز ازمرکز وجود داشته باشد ؟ توضیح دهید .

۴) ــ چرا وقتی کـه اتومبیل در یـك روز بارانی بـه سرعت در جـاده حرکت می‌کند قطره‌های آب مماس برچرخها به خارج پرتاب می‌شوند؟

۵) ــ گلوله‌ای بـه انتهای نخی بسته شده ودر سطح افقی حـول نقطه ثابتی می‌گردد . اگرطول نخ نصف وسرعت زاویه‌ای حرکت دوبرابر شود نیروی کشش نخ چند برابرخواهدشد؟

۶) ــ دوچــرخه سواری مسیر دایره‌ای شکل را با سرعت v دور می‌زند . اگر دوچرخه سوار همان مسیررا با سرعت ۲v دوربزند کدام یك ازکمیتهای زیر دوبرابر می‌شود ؟

۱ــ شتاب جانب مرکز　　　۲ــ زاویه انحراف دوچرخه سوار از راستای قائم

۳- سرعت زاویه‌ای　　　　　۴- پرید دور زدن

۷) - اتومبیلی با سرعت ثابت دوپیچ متوالی جاده‌ای را برمسیرهای دایره‌ای می‌پیماید. اگر شعاع مسیرآن درپیچ اول دوبرابر شعاع مسیرآن درپیچ دوم باشد نیروهای جانب مرکز مؤثر بر اتومبیل را دراین دوپیچ متوالی با هم مقایسه کنید.

۸) - وزنه سنگینی بـه انتهای ریسمانی به طول ثابت بسته شده و در سطح قائم باپرید ثابت حول نقطه ثابتی می‌گردد. کدام یك ازکمیتهای زیردرضمن حرکت این وزنه ثابت می‌ماند؟

۱- تعداد دورها درثانیه　　　　۲- سرعت زاویه‌ای

۳- سرعت حرکت برروی مسیر　۴- نیروی کشش ریسمان

جواب خود را با استدلال بیان کنید.

۹) - چرا نیروی جاذبهٔ بین دوجسم معمولی، مثلا دوکتاب قابل توجه نیست؟

۱۰) - نیروی جـانب مرکزی که یك مـاهواره را در مـدار خود بـه دور زمین نگاه می‌دارد چیست؟

۱۱) - برای تعیین جرم زمین چه معلوماتی لازم است؟

۱۲) - با استفاده از جرم و شعاع کـره ماه نشان دهید کـه شدت میدان جاذبه در سطح ماه در حدود $\frac{۱}{۶}$ شدت میدان جاذبه زمین است.

(جرم ماه $۷/۳۴ \times ۱۰^{۲۲}kg$ و شعاع ماه $۱/۷۴ \times ۱۰^{۶}m$ است)

۱۳) - از قانـون جاذبهٔ عمومی نیوتن چـه مطلبهائی نتیجه گـرفته می‌شود؟ در بارهٔ هریك توضیح کوتاهی بدهید.

۱۴) - دوران زمین به‌دور خود چه تأثیری در وزن اجسام واقع در استوا و درقطبهای زمین دارد؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱) - دور صفحه‌های بیشتر گرامافونهای تجارتی روی $۱۶\frac{۲}{۳}$ و $۳۳\frac{۱}{۳}$ و ۴۵ و ۷۸ دور در دقیقه تنظیم می‌شود. پرید مربوط به هریك ازاین دورها را حساب کنید.

۲) - سرعت خطی حرکت دورانی زمین به‌دور محور خود را دریك نقطه ازخط استوای زمین حساب کنید. شعاع استوائی زمین را ۶۴۰۰ کیلومتر بگیرید.

۳) - جعبه‌ای روی کف یك بارکش قـرار داد و ضریب اصطلاك لغزشی بین جعبه و کف

بارکش ۰/۳۳ است معین کنید این بارکش دریك پیچ جاده بشعاع ۱۰۰ مترحداکثر باچه سرعتی می‌تواند حرکت کند تا جعبه بر کف کامیون نلغزد .

جواب : $۱۸ \frac{m}{s}$

۴)ـ وزنه‌ای بـه جرم $۲/۰kg$ به انتهای ریسمان سبکی به طول $۲/۰m$ بسته شده و مانند یك پاندول مخروطی برروی مسیر دایره‌ای شکلی درسطح افقی با سرعت ثابت می‌گردد . اگر امتداد ریسمان با راستای قائمی که از آویزگاه وزنه می‌گذرد زاویه °۳۰ بسازد مطلوبست

الف ـ شعاع مسیر وزنه

ب ـ سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی وزنه

پ ـ اندازه نیروی جانب مرکز و نیروی کشش ریسمان

جواب: الف) $۱m$ ب) تقریباً $۲/۴\frac{rad}{s}$ و $۲/۴\frac{m}{s}$ پ) $۱۱/۵N$ و $۲۳N$

۵) ـ شخصی یـك سطل محتوی آب را در سطح قائم برمسیر دایره‌ای به شعاع یك متر می‌چرخاند. مطلوبست حداقل سرعت لازم برای این که آب درون سطل نریزد.

جواب: $۳/۱۳\frac{m}{s}$

۶) ـ اگر کـره زمین فاقد هوا بود چه زمانی طول می‌کشید تا یك ماهواره در مجاورت سطح زمین (به فاصله مثلا ۶۴۰۰ کیلومتر از مرکز زمین) یك دورکامل بدور زمین بگردد وسرعت آن چه اندازه بود؟ توضیح دهید چرا غیرممکن است که پریه حرکت یك ماهواره بدور زمین کمتر از ۸۰ دقیقه باشد؟

۷) ـ می‌دانیم درمـدل اتمی بور اتم هیدروژن تشکیل یافته است از یـك الکترون با بار الکتریکی $-e$ که به دور یك پروتون با بار الکتریکی $+e$ می‌گردد . با توجه به این که بار الکتریکی الکترون تقریباً $۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}$ کولن و جرم آن $۹/۱ \times ۱۰^{-۳۱}$ کیلوگرم است در حالتی کـه شعاع مدار الکترون ثابت است نسبت بین نیروی جاذبهٔ الکتریکی کولنی و نیروی جاذبهٔ عمومی نیوتنی بین الکترون و پروتون را در اتم هیدروژن حساب کنید. کـدام یك از این دونیرو در نگاهداشتن الکترون برروی مدار حرکت خود مؤثر است؟ آیا نیروی جاذبهٔ نیوتنی درمقابل جاذبه الکتریکی کولنی قابل توجه است؟ جرم پروتون تقریباً ۲۰۰۰ برابر جرم الکترون است.

یادآوری : ثابت نیروی الکتریکی کـولنی $k = ۹/۰ \times ۱۰^{۹} \frac{N.m^{۲}}{c^{۲}}$ و ثابت جهانی جاذبه $G = ۶/۶۷۳ \times ۱۰^{-۱۱} \frac{N.m^{۲}}{kg^{۲}}$ است.

$$\frac{\text{نیروی الکتریکی}}{\text{نیروی جاذبه}} \simeq ۲/۱ \times ۱۰^{۳۹}$$:جواب

درجواب قسمتهای بعدی بحث لازم است .

۸) ـ خورشید درنقطه‌ای از کهکشان ما واقع شده است که **فاصله آن ازمرکز کهکشان** درحدود ۳۰۰۰۰ سال نوری است (یك سال نوری تقریباً **$۹/۴۶ \times ۱۰^{۱۲}km$ است) وباسرعتی** معادل $۲۵۰ \frac{km}{s}$ به دور مرکز کهکشان می‌چرخد .

الف ـ شتاب جانب مرکز خورشید نسبت **به مرکز کهکشان چه اندازه است ؟**

ب ـ اگر جرم خورشید $۱/۹۸ \times ۱۰^{۳۰}kg$ **باشد نیروی جانب مرکزی‌که لازم است** تا خورشید را برمسیر دایره‌ای به دور مرکز **کهکشان نگاه دارد چه اندازه است؟**

پ ـ این نیروی جانب مرکز را بانیروی جانب مرکزی‌که **ازطرف خورشید برزمین وارد** می‌شود مقایسه کنید. جرم‌زمین **$۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴}kg$ وفاصله‌زمین ازخورشید $۱/۴۹۵ \times ۱۰^{۸}km$** است .

جواب : الف) $۲/۲ \times ۱۰^{-۱۰}m/s^{۲}$ ب) $۴ \times ۱۰^{۲۰}N$ پ) تقریباً $\frac{۱}{۱۰۰}$

۹ـ چه سرعتی باید یك ماهـواره داشته باشد تا در مداری بـه شعاع ۶۷۰۰ کیلومتر (یعنی درفاصله ۶۷۰۰ کیلومتری مرکز زمین) **به‌گرد زمین بگردد ؟**

جواب : تقریباً $۷/۸ \frac{km}{s}$

۱۰ـ جرم زمین تقریباً ۸۰ برابر جرم ماه است. **اگر فاصله بین مرکزهای زمین و ماه** را به r نمایش دهیم معین کنید درچه نقطه‌ای ازاین فاصله **نیروهای جاذبه ماه وزمین برروی یك** سفینه فضائی‌که عازم‌کره ماه است **باهم برابر می‌شود.**

جواب : تقریباً در فاصله $\frac{۷۱}{۷۹} r$ ازمرکز زمین

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۷

۷-۱) ـ فقط معرف سرعت متوسط . برای محاسبه سرعت لحظه‌ای کافی است از معادلهٔ مسیر مشتق بگیریم .

۷-۲) ـ T^{-1}

۷-۳) ـ کافی است از رابطهٔ $S=R\theta=R\omega t$ که در واقع معادلهٔ مسیرحرکت است نسبت به زمان مشتق بگیریم.

$$v=\frac{ds}{dt}=R\omega$$

۷-۴) ـ علت این است که جسم در اثر تندی که کسب می‌کند و راستای آن همواره بردایره مسیر مماس است می‌خواهد طبق قانون ماند درامتداد مماس‌بردایره مسیر به‌حرکت خود ادامه دهد ولی نیروی جانب مرکز مانع ادامه این حرکت شده وجسم را مجبور می‌کند برمسیر دایره‌ای حرکت نماید.

۷-۵) ـ بلی ، این شتاب ناشی از تغییر مقدار سرعت $\left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)$ است که در راستای بردار سرعت (یعنی مماس برمسیر حرکت) است و شتاب مماسی نامیده می‌شود.

۷-۶) ـ کافی است در رابطه (۷-۱۶) به جای ω مقدار $\frac{2\pi}{T}$ را قرار دهیم و T را حساب کنیم :

$$\frac{1}{\cos\theta}=\frac{l\cdot 4\pi^2}{gT^2}$$

و

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l\cos\theta}{g}}$$

۷-۷) ـ این رابطهٔ اصولا برای جرمهای نقطه‌ای (یعنی جرمهائی که بنا به‌فرض در یك نقطه متمرکز شده‌اند) درنظرگرفته شده‌است. کاربرد این‌قانون درباره خورشید و سیاره‌های دیگر کاملا مجاز است، زیرا فاصله‌های سیاره‌ها از خورشید نسبت به‌ابعادشان آن قدر زیاد است که می‌توانیم ابعاد آنها را درمقابل فاصله‌شان ناچیز بگیریم. این رابطه درمورد اجسام جامد کروی شکل و همگن نیز به‌درستی صادق است به شرط آن‌که فرض‌کنیم تمام جرم آنها درمرکز کره متمرکز است. دراین صورت r فاصله بین مرکزهای دو کره خواهد بود.

۷-۸) ـ شدت میدان عبارتست از نیروی وارد برواحد جرم و برحسب $\frac{N}{kg}$ بیان می‌شود و دیمانسیون آن چنین است :

$$\frac{MLT^{-2}}{M}=LT^{-2}$$

و می‌دانیم که LT^{-2} دیمانسیون شتاب است.



کار ـ انرژی

می‌دانیم انـرژی به‌صورتهای مختلف مانند گرمـا ، صوت ، نور ، انرژی مکانیکی ، انرژی شیمیائی ، انرژی الکتریکی ، انرژی هسته‌ای و . . . ظاهر می‌شود . هر یك از این انرژیها در زندگی ما دارای اهمیت بسیار است به طوری‌که می‌توان گفت انرژی در میان مظاهردیگرطبیعت مهمترین نقش را به‌عهده دارد، زیرا معرف جوهر و ماهیت اشکال مختلف ماده است.

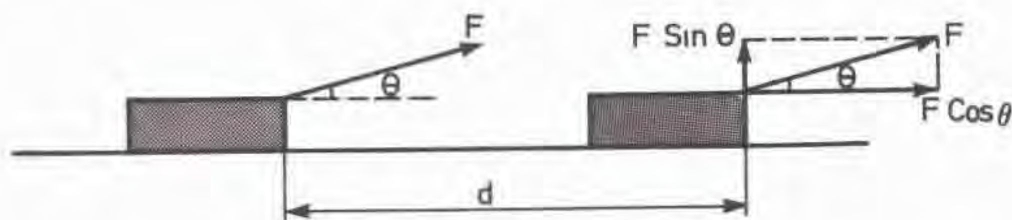
«کار» دارای مفهـوم فیزیکی دیگـری است کـه با انرژی ، به ویژه انرژی مکانیکی ارتباط نزدیك دارد . در فیزیك سال اول با مفاهیم کار و انرژی به‌خوبی آشنا شده‌اید؛ دراین جا نیز این مفاهیم فیزیکی را با تفصیل بیشتری‌دنبال خواهیدکرد . چون برای تعریف انرژی می‌توان از مفهوم کار استفاده‌کرد دراین بخش نخست مفهوم فیزیکی کار را دنبال خـواهیم کرد سپس به بیان رابطهٔ کار و انرژی خواهیم پرداخت.

کار

می‌دانیم کار ازنظرفیزیکی وقتی انجام می‌گیرد که نیروئی سبب جا به‌جا شدن نقطه اثرخود شود. بنابراین ساده‌ترین تعریف کـار در فیزیك ایـن است که بگوئیم کار برابراست باحاصل ضرب اندازه نیرو دراندازه جابه‌جایی نقطهٔ اثرنیرو در راستایی‌که نیرو اثر می‌کند . مثلا اگـر نقطه اثر نیروی ثابت $\overrightarrow{F}$ در راستای نیرو به‌اندازه d جا به‌جا شود کار انجام‌شده برابر است با ـ

$$W = F.d \qquad (۱-۸)$$

اگرنیروی $\overrightarrow{F}$ در راستای جا به جایی نباشد بدیهی است همه این‌نیرو صرف تغییر مکان جسم‌نمی‌شود و برای محاسبهٔ کار باید « همنه نیرو در راستای جا به جایی» را درنظربگیریم. مثلا اگرجسمی در راستای افقی جا به‌جا شود ونیروی $\overrightarrow{F}$ وارد برآن باراستای جا به جایی زاویه θ بسازد (شکل ۸-۱) اندازه همنه‌های این نیرو در دو راستای افقی وقائم‌به‌ترتیب $F\cos\theta$ و $F\sin\theta$ خـواهند بود. همنه قائم $F\sin\theta$ کار انجام نمی‌دهد زیرا برراستای افقی تغییر مکان جسم عمود است وجسم هم در راستای قائم جابه‌جا



$$W=(F\cos\theta)d=F(d\cos\theta)$$

شکل ۸–۱ برای محاسبه‌کار باید نیرو و جا به جایی هردو دریك راستا منظور شوند.

نمی‌شود ولی این همنه سبب می‌شود که جسم فشار کمتری برسطح افقی وارد سازد و در نتیجه نیروی اصطلاك کمتر شود.

پرسش ۸–۱– آیاممکن‌است همنه قائم $F\sin\theta$ درمواردی سبب افزایش نیروی اصطلاك شود؟

همنه $F\cos\theta$ در راستای جا به جایی است و تنها این همنه است که کار انجام می‌دهد بنا براین اندازه کار همنه $F\cos\theta$ وقتی که جسم به اندازه d جا به جا می‌شود برابر است با :

$$\boxed{W=F\cos\theta.d=F.d\cos\theta} \qquad (۲\text{–}۸)$$

رابطه (۸–۲) نشان می‌دهد که کار بستگی بسه عامل نیرو ، جا به جایی و زاویه بین راستاهـای نیرو و جا به جایی دارد . در حالتی‌که $\theta=۰°$ $(\cos\theta=۱)$ باشد نیرو در راستای جا به‌جایی است و $W=F.d$ است . و در حالتی که $\theta=۹۰°$ $(\cos\theta=۰)$ باشد نیرو بر راستای جا به جایی عمود و $W=۰$ است. به‌همین جهت وقتی که جسمی روی سطح افقی جابه‌جا می‌شود نیروی وزن‌آن کار انجام نمی‌دهد زیرا راستای آن برامتداد جا به‌جایی عمود است.

پرسش ۸–۲– اگر $\theta > ۹۰°$ باشدکسینوس θ منفی و درنتیجه کار منفی است. کارمنفی چه‌مفهومی دارد .

کار حاصل ضرب اسکالردوبردار نیرو وجابه‌جایی است – حاصل ضرب اسکالر دوبردار $\vec{A}$ و $\vec{B}$ ، بنا به‌تعریف کمیتی است اسکالرکه برابر است باحاصل ضرب بزرگی بردارها درکسینوس زاویه بین دوبردار یعنی :

$$C=A.B\cos\theta \qquad (۳\text{–}۸)$$

وبه صورت برداری، چنین نمایش داده می‌شود :

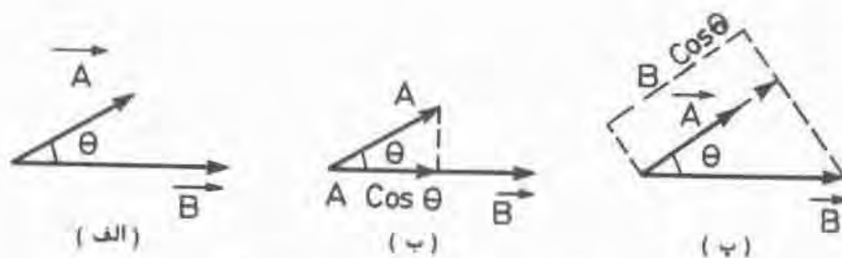
$$C=\vec{A}\,.\,\vec{B}$$

بدیهی است این حاصل‌ضرب به‌ازاء $\theta=۰°$ ماکزیمم و به‌ازاء $\theta=۹۰°$ صفر و به‌ازاء مقادیر θ بین °۹۰ و °۲۷۰ منفی است. یکی از ویژگیهای‌حاصل‌ضرب اسکالر دوبردار این است‌که علامت ومقدار این حاصل ضرب بستگی به‌ترتیب عوامل ضرب ندارد یعنی :

$$C=\vec{A}.\vec{B}=A(B\cos\theta)=B(A\cos\theta)=\vec{B}.\vec{A}$$
$$(۴\text{–}۸)$$

$A\cos\theta$ ، تصویر بردار $\vec{A}$ روی بردار $\vec{B}$ است ولی $B\cos\theta$ تصویر بردار $\vec{B}$ روی بردار $\vec{A}$ است (شکل ۲.۸ ب و پ) .

اگر درنظر بگیریم‌که نیروی $\vec{F}$ و جا به‌جایی $\vec{d}$ کمیتهای برداری هستند و کار W کمیت اسکالر



شکل ۸-۳- حاصل ضرب اسکالر دو بردار

$$\vec{A}.\vec{B}=A.B\cos\theta=B.A\cos\theta$$

است، می‌توانیم بگوئیم که کار هم حاصل‌ضرب اسکالر دوبردار $\vec{F}$ و $\vec{d}$ می‌باشد. یعنی :

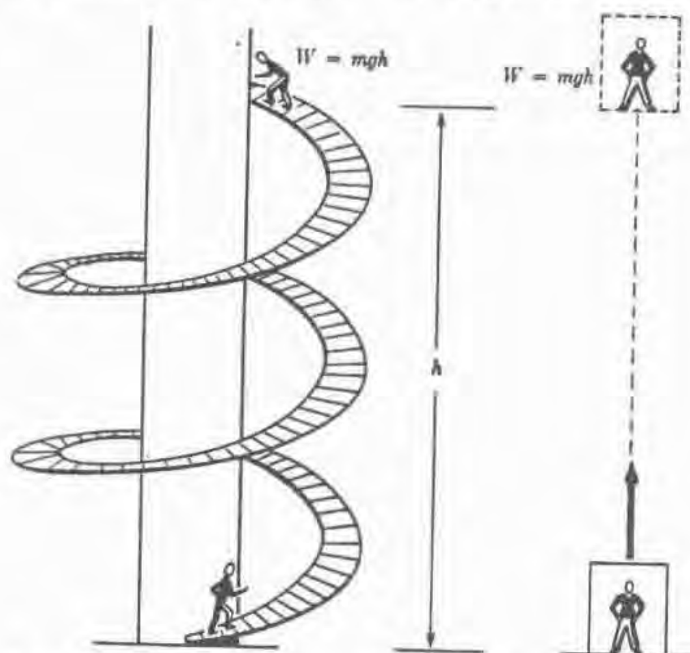
$$W=\vec{F}.\vec{d}=F.d\cos\theta=$$

$$d.F\cos\theta=\vec{d}.\vec{F} \qquad (۵-۸)$$

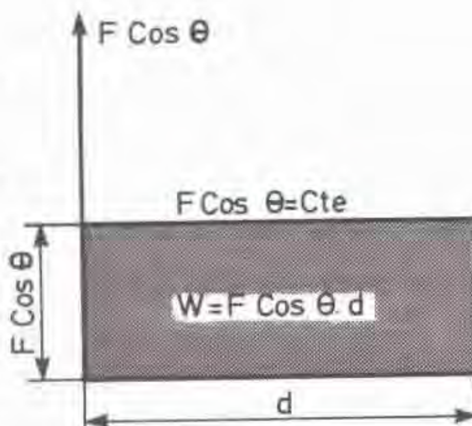
بدیهی است $F\cos\theta$ تصویر نیروی F بر راستای تغییر مکان و $d\cos\theta$ تصویر تغییر مکان برراستای نیرو است. این خاصیت محاسبه کار را درمواردی که نیرو و امتداد آن ثابت ولی جا به‌جائی غیرمشخص است آسان می‌کند. مثلاً کار لازم برای انتقال جسمی به جرم m و به وزن mg از سطح زمین به ارتفاع h ، در صورتی‌که اصطلاك درکار نباشد برابر است با :

$$W=mg.h$$

که فقط بستگی به ارتفاع h دارد نه به‌مسیری‌که جسم در روی آن انتقال داده می‌شود (شکل ۸-۴) .



شکل ۸-۴ - اگر اصطکاك درکار نباشدکار لازم برای بالابردن جرم m به ارتفاع h برابر است با W=mgh



شکل ۸-۵- وقتی‌که نیروی $\vec{F}$ و راستای آن ثابت است اندازه کار برابر است بامساحت مستطیلی که ابعاد آن $F\cos\theta$ و d می‌باشند.

رابطهٔ (۸-۲) و نمودار شکل (۸-۵) نشان می‌دهند وقتی‌که نیروی $\vec{F}$ و راستای آن ثابت است اندازهٔ‌کار W برابر مساحت مستطیلی است‌که ابعاد آن d و $F\cos\theta$ هستند. نمایش‌کار به وسیله نمودار مهم است، زیرا درمواردی هم‌که نیرو ثابت نیست می‌توان از این روش برای محاسبه‌کار استفاده‌کرد.

واحد و دیمانسیون‌کار ــ در دستگاه بین المللی واحدهاکه نیرو برحسب نیوتن وجابه‌جایی‌برحسب متر است، کار برحسب واحد «ژول» (با علامت اختصاری J) بیان می‌شود و بنا به تعریف[1] :

$$1(J) = 1(N) \times 1(m)$$

بنابراین :

$$W_{(J)} = \vec{F}_{(N)} \cdot \vec{d}_{(m)} \qquad (۸-۶)$$

دیمانسیون‌کار ML^2T^{-2} است ، زیرا دیمانسیون نیرو MLT^{-2} و دیمانسیون جابجایی L است و $\cos\theta$ بدون دیمانسیون می‌باشد .

کار برای غلبه براصطکاک ــ برای این‌که جسمی عملا با تندی ثابت برسطح افقی حرکت کند معمولا نیرونی لازم است . این نیرو برای غلبه برنیروی اصطکاك واردمی‌شود. اگرضریب اصطلاك بین‌جسم وسطح μ باشد نیروی اصطکاك برابر است با :

$$f = \mu N$$

کاری کــه ضمن جا به جا شدن جسم ، برای غلبه براصطکاك انجام می‌شود برابر است با:

$$W_f = f \cdot d = \mu N \cdot d \qquad (۸-۷)$$

وقتی‌که‌جسم‌روی‌سطح افقی‌حرکت‌می‌کند $N = mg$ است بنابراین :

$$W_f = \mu mg \cdot d \qquad (۸-۸)$$

مثلا اگرجسمی به جرم ۵/۰kg روی سطح افقی‌که ضریب اصطکاك آن ۰/۲۵ است با تندی ثابت به اندازه ۲/۰ متر کشیده شودکاری که برای غلبه بر اصطکاك انجام می‌شود برابر است با:

$$W_f = 0/25 \times 5/0 \times 9/80 \times 2/0 = 24/5J$$

این کاربه‌مراتب کمتراز کاری‌است‌لازم که‌است تاهمین جسم در راستای قائم به‌اندازه ۲ متر بالا برده شود،

۱- به‌طوری که دربخش ۳ دیدیم اگر در دستگاه CGS نیرو برحسب دین ($10^{-5}N$) و جا به جایی برحسب سانتیمتر ($10^{-2}m$) بیان شودکار برحسب واحدی بنام ارگ (erg) بیان می‌گردد :

$$1(erg) = 1(dyne) \times 1(cm) = 10^{-7}J$$

زیرا در این حالت کار، برای غلبه برجاذبه انجام می‌شود و برابر است با:

$$W_g = mgh = ۵/۰ \times ۹/۸۰ \times ۲/۰ = ۹۸J$$

دراین مثال به طوری‌که ملاحظه می‌شود کار نیروی اصطکاك $\frac{۱}{۴}$ کار نیروی وزن است.

چون کارنیروی اصطکاك بازدهی ندارد وتلف می‌شود تمام کوششها براین است که اصطکاك در مقابل حرکت تا جائی‌که ممکن است کم شود.

پرسش ۸-۳ ـ کار نیروی اصطکاك به چه صورت ظاهر می‌شود؟

انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی

می‌دانیم انرژی مکانیکی به دوصورت انرژی پتانسیل (E_p) وانرژی جنبشی (E_c) ظاهرمی‌شود.

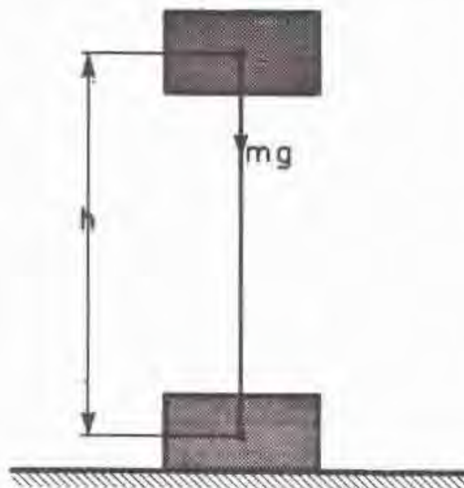
۱ـ انرژی پتانسیل ـ انرژی پتانسیل، قابلیت انجام کار نهفته دریك جسم است‌که آن جسم به‌سبب وضع یا حالت ویژه خود دارا می‌باشد. اتـومبیلی که در سراشیبی تپه‌ای قرار دارد، یا فنر ساعتی‌که کوك شده است، یاآبی‌که پشت یك سد موجود است مثالهایی ازاجسامی هستندکه دارای‌انرژی پتانسیل‌می‌باشند: اتومبیل بالای تپه اگر آزاد شود می‌تواند مسافت زیادی را با موتور خاموش بپیماید، فنر جمع شده ساعت می‌تواند مدت درازی چرخهای ساعت را به کار اندازد و آب پشت سد می‌تـواند در پائین سد توربینهای دستگاه مولد برق را به‌حرکت در آورد.

پرسش ۸-۴ ـ وقتی‌که دو تیغه مس و روی در الکترولیت محلول اسید سولفوریك دقیق‌گذارده می‌شود چـه نوع انـرژی بین ایـن دو تیغه ایجاد می‌شود؟

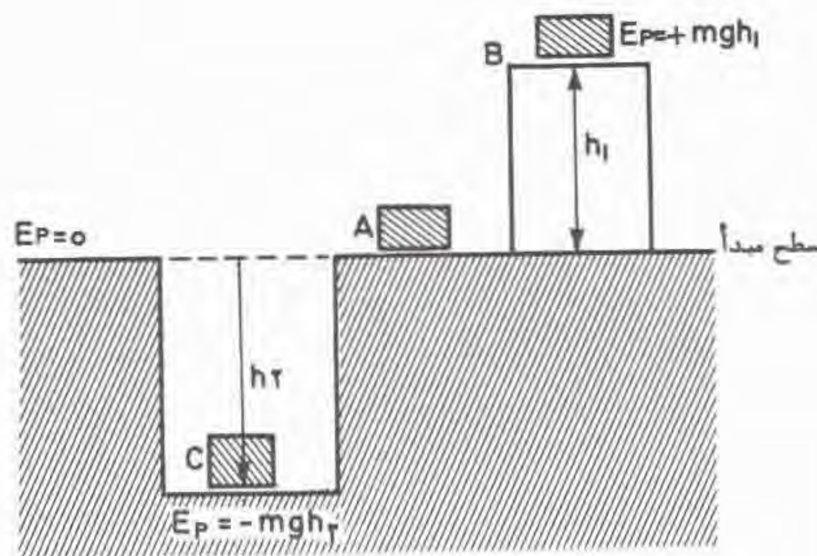
انرژی پتانسیل یك جسم را به وسیله مقدار کاری‌که می‌تواند انجام‌دهد اندازه می‌گیرند بنابراین برحسب‌واحدکار (یعنی‌ژول) بیان‌می‌شود. انرژیهای زیاد را بـرحسب کیلو ژول ($kJ = ۱۰^۳J$) و یـا مگاژول ($MJ = ۱۰^۶J$) و یـا کیلـو وات ساعـت ($kWh = ۳۶۰۰kJ$) بیان می‌کنند.

انرژی پتانسیل جاذبه‌ای ـ وقتی کـه جسمی بـه جـرم m را مطابق شکل (۸-۶) از سطح زمین تا ارتفاع h بالا می‌بریم، جسم درارتفاع h به سبب وضعیت ویژه‌ای‌که نسبت به‌حالت نخستین خود پیدا می‌کند دارای انرژی پتانسیل خـواهد شد. چون برای بردن جرم m به ارتفاع h، حداقل بایدکار mgh را انجام‌دهیم این کار به‌صورت «انرژی پتانسیل جاذبه‌ای» درجسم ذخیره می‌شود:

(۸-۹)	$E_p = mgh$ انرژی پتانسیل جاذبه‌ای



شکل ۸-۶- یك جسم به‌سبب وضع یاحالت ویژه خود می‌تواند دارای انرژی پتانسیل بشود.



شکل ۸-۷- انرژی پتانسیل جاذبه‌ای نسبت به یك سطح مقایسه ممکن است مثبت یا منفی باشد.

اگر جسم دوباره به سطح زمین برگردد این انرژی پس داده می‌شود [۱].

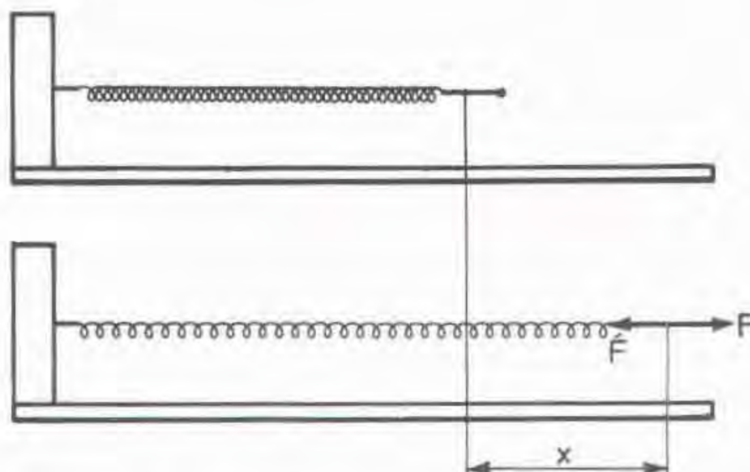
انرژی پتانسیل جاذبه‌ای را معمولا نسبت به یـك سطح مقایسه یا سطح مبدأ (مثلا سطح دریا) که انرژی پتانسیل درآن صفردرنظر گرفته می‌شود، می‌سنجند. اجسامی‌کـه بالای این سطح مبدأ قـرار می‌گیرند بنا به قـرارداد دارای انـرژی پتانسیل جاذبه‌ای مثبت واجسامی که درپائین این سطح واقع می‌شوند دارای انرژی پتانسیل جاذبه‌ای منفی هستند (شکل ۸-۷)

وقتی که می‌خواهیم جرم m را مطابق شکل از A به B ببریم باید کار انجام دهیم. این کار به صورت $+mgh_1$ درجسم ذخیره می‌شود. موقعی که جرم m از B به A برمی‌گردد کار mgh_1 را به جسم دیگر پس می‌دهد و انرژی پتانسیل آن کم می‌شود. به همین ترتیب هنگامی‌که جرم m از A به C منتقل می‌گردد به اندازه mgh_2 انرژی پتانسیل ازدست می‌دهد به‌طوری‌که انرژی پتانسیل آن درنقطه C کمتر از انرژی پتانسیل آن درنقطه A است.

پرسش ۸-۵- اگر با اعمال نیرو، جسمی با تندی ثابت روی یك سطح افقی از یك نقطه به‌نقطه دیگر منتقل شود به طوری که انرژی پتانسیل آن تغییر نکند کاری که انجام می‌گیرد چگونه مصرف می‌شود؟

پرسش ۸-۶- اگر جسمی روی‌سطح‌شیب‌داری کـه دارای اصطکاك است باتندی ثابت بالا کشیده شودکاری‌که انجام می‌گیرد به چه تبدیل می‌شود؟

۱- رابطه ۸-۹ درصورتی درست است‌که اندازه g درطول مسیر h ثابت باشد. اگرجرم m ازسطح زمین خیلی دور شود مقدار g و درنتیجه نیروی mg ثابت نمی‌ماند و چنان‌که دیدیم به نسبت عکس مجذور فاصله تغییرمی‌کند. برای محاسبهٔ‌کار باید این تغییرات منظور شود. این محاسبه ازبرنامه‌کار این‌کلاس خارج است.



شکل ۸-۸- وقتی‌که یك فنر با نیروی F کشیده می‌شود کار این نیرو به صورت انرژی پتانسیل الاستیك در آن فنر ذخیره می‌گردد .

انرژی پتانسیل یك فنر - فنری را مطابق شکل ۸-۸ درنظر بگیریم که یك سر آن به نقطه‌ای بسته شده است و سر دیگـر آن با نیروی افقی F کشیده می‌شود. بدیهی است فنر دراثر این نیرو تغییرشکل پیدا کرده ونیرویی اعمال می‌کندکه تا حدکشسانی ، متناسب باافزایش طول آن است . اگر افزایش طول فنر را به x نمایش دهیم اندازه این نیرو از رابطه

$$F = kx$$

به دست می‌آید . k چنان‌که می‌دانیم ضریب سختی فنر است کـه آن را به‌نام « ثابت فنر » می‌شناسیم . نیروی کشسانی کـه فنر اعمال می‌کند همواره برابر نیروی F ولی درخلاف جهت آن است یعنی

$$F' = -F = -kx$$

وقتی‌که طول فنربه‌اندازه x افزایش می‌یابدکاری که نیروی F انجام می‌دهد به صورت انرژی پتانسیل کشسانی (انرژی پتانسیل الاستیك) در فنر ذخیره می‌شود. چون نیروی F ثابت نیست برای محاسبه این کار باید نیروی متوسط $\overline{F}$ را حساب کرده و در x ضرب‌کنیم یعنی

$$W = \overline{F}.x$$

ولی موقعی که $x = 0$ است نیروی F نیزصفراست بنابراین

$$\overline{F} = \frac{0 + kx}{2} = \frac{1}{2}kx$$

درنتیجه

$$W = \overline{F}.x = \frac{1}{2}kx.x$$

و یا

$$\boxed{W = \frac{1}{2}kx^2} \qquad (۱۰-۸)$$

انرژی پتانسیل‌کشسانی فنر نیز برابر است با

$$\boxed{E_p = \frac{1}{2}kx^2} \qquad (۱۱-۸)$$

پرسش ۸-۷- اگرفنردراثراعمال نیرومتراکم شود آیا بازهم این رابطه دربارهٔ آن صادق است ؟

مثال - اگر یك سرفنری راکه سردیگر آن به نقطه‌ای بسته شده است با نیروی $۶۰/۰N$ بکشیم فنر $۰/۲۴$ سانتیمتر افزایش طول پیدا می کند. ضریب سختی وکار داده شده به فنر را حساب کنید.

ـ ضریب سختی یا ثابت فنر برابر است با :

$$k=\frac{F}{x}=\frac{۶۰/۰N}{۰/۲۴۰m}=۲۵۰/۰\frac{N}{m}$$

کار داده شده به فنر که به صورت انـرژی پتانسیل درآن ذخیره می‌شود برابر است با:

$$W=\frac{۱}{۲}kx^۲=\frac{۱}{۲}\frac{F}{x}\cdot x^۲=\frac{۱}{۲}Fx=\frac{۱}{۲}$$
$$\times ۶۰/۰N\times ۰/۲۴۰m=۷/۲۰J$$

۲-انرژی جنبشی - انرژی جنبشی (یاانرژی سینتیك) قابلیت انجام کار دریك جسم متحرك است که آن جسم به‌سبب حرکت خود دارا می‌باشد. مثلا یك اتومبیل که درجاده‌ای حرکت می کند دارای انرژی جنبشی انتقالی است وچرخ طیار یك ماشین که به‌دورمحور ثابت خود می‌چرخد دارای انرژی جنبشی دورانی است .

انرژی‌جنبشی یك‌جسم به‌جرم m که باسرعت ثابت v حرکت می کند از رابطهٔ زیر حساب می‌شود:

$$E_c=\frac{۱}{۲}m\,v^۲ \qquad (۱۲\text{-}۸)$$

مثلا انرژی جنبشی یك اتومبیل به‌جرم $۱۰۰۰kg$ که با سرعت $۲۰\frac{m}{s}$ $\left(۷۲\frac{km}{h}\right)$ در جاده‌ای حـرکت می‌کند برابر است با :

$$E_c=\frac{۱}{۲}\times(۱۰^۳kg)\times\left(۲۰\frac{m}{s}\right)^۲=$$
$$۲\times۱۰^۵kg\frac{m^۲}{s^۲}=۲\times۱۰^۵J=۲۰۰kJ$$

پرسش ۸-۸-نشان‌دهیدکه دیمانسیون انرژی جنبشی با دیمانسیون کار یکی است.

جسم متحرك دارای انرژی است و می‌تواند کارانجام دهد. زیرا اگر بخواهند آن را متوقف کنند باید بر آن یك نیروی مقاوم $\vec{F}$ وارد سازند و این نیرو درمسافت x که جسم می‌پیماید تامتوقف شود کـار $\vec{F}\cdot\vec{x}$ را انجام می‌دهد . همین نیرو را جسم متحرك می‌تواند به جسم دیگر وارد سازد و آن را جابجاکند. برعکس اگر جسم ساکنی به‌جرم m روی یك سطح افقی بدون اصطکاك تحت اثرنیروی ثابت $\vec{F}$ قرارگیرد و پس ازپیمودن مسافت x سرعتش به v برسد کار $\vec{F}\cdot\vec{x}$ به‌صورت انرژی‌جنبشی $\frac{۱}{۲}mv^۲$ درجسم ذخیره می‌شود. یعنی :

$$\vec{F}\cdot\vec{x}=\frac{۱}{۲}m\,v^۲ \qquad (۱۳\text{-}۸)$$

این کیفیت را به‌صورت کلی‌تری تحت عنوان قضیهٔ انرژی جنبشی بیان می‌کنیم.

قضیه انرژی جنبشی - تغییر انرژی جنبشی یك جسم جامد درمدت معین برابراست با کار نیروی (یا نیروهای) وارد برجسم درهمان مدت.

درنظربگیریم که برجسمی به جرم m نیروی ثابت و افقی F وارد می‌شود وجسم دراثر این نیرو با شتاب ثابت a روی خط راست حرکت می‌کند .

اگر جسم درمبدأ زمان دارای‌سرعت اولیه v_0 باشد وپس از گذشت زمان t سرعتش به v برسد مسافت پیموده شده طبق رابطه ۲ - ۱۳ (بخش ۲) برابر است با :

$$x=\frac{v^2-v_0^2}{2a}$$

چون بنا به‌قانون دوم نیوتن $F=ma$ است کاری که این نیرو ضمن جابجایی x انجام می‌دهد برابر است با :

$$W=F\ .\ x=ma\ .\ \frac{v^2-v_0^2}{2a}$$
$$=m\ \frac{v^2-v_0^2}{2}$$

یا :

$$\boxed{W=F\ .\ x=\frac{1}{2}m\,v^2-\frac{1}{2}m\,v_0^2} \qquad (۸-۱۴)$$

ویا :

$$\boxed{W=F.x=\Delta E_c} \qquad (۸-۱۵)$$

ΔE_c نمایش تغییر انرژی جنبشی جسم در مدت اثر نیرو است.

بدیهی است اگرجسم ازحال سکون شروع‌به حرکت‌کند ($V_0=0$) کارنیروی وارد برجسم‌مطابق رابطه (۸-۱۳) برابر $\frac{1}{2}mV^2$ است. درصورتی که برجسمی چند نیرو اثرکند ΔE_c برابرمجموع‌جبری کار این نیروها خواهد بود.

روابط بالا برای حالتی است‌که اصطکاك‌ناچیز است درعمل مقداری از کار نیروی محرك $\vec{F}$ به وسیلهٔ اصطکاك جذب وبه‌گرما تبدیل می‌شود، در نتیجه ΔE_c کوچکتر ازکار نیروی محرك است.

توان ـ تـوان یك دستگاه کـه کار انجام می‌دهد بنا به‌تعریف عبارتست ازخارج قسمت‌کار انجام‌شده برزمان انجام کار یعنی

$$\text{توان}=\frac{\text{کار}}{\text{زمان انجام کار}}$$

یا :

$$P=\frac{W}{t} \qquad (۸-۱۶)$$

رابطه ۸-۱۶ در واقع معرف توان متوسط دستگاهی است‌که کار انجام می‌دهد و نشان می‌دهد که هرچه کار سریعتر انجام‌گیرد یعنی در مدت کوتاهتری کار بیشتری‌انجام شود توان دستگاه بیشتراست.

دیمانسیون توان ML^2T^{-3} و واحدآن در دستگاه‌بین‌المللی واحدهاوات (باعلامت اختصاری W) است. یك وات ، چنان‌که می‌دانیم ، برابریك ژول کار درمدت یك ثانیه است:

$$\boxed{1W=\frac{1J}{1s}}$$

بنابراین :

$$\boxed{P_{(W)}=\frac{w(j)}{t(s)}} \qquad (۸-۱۷)$$

توانهای‌بزرگ‌را برحسب‌کیلووات($kW=10^3W$) و مگاوات ($MW=10^6W$) بیان می‌کنند.

قانون بقای انرژی

قانون‌بقای انرژی یکی ازمهمترین قانونهای طبیعت است. دربارهٔ بقای‌انرژی زیاد بحث شده و قانون بقای انرژی به‌صورتهای‌مختلف بیان‌گردیده

است. دراین‌جا سه بیان متفاوت را که مفهوم همهٔ آنها یکی است برای نمونه یادآور می‌شویم :

۱ـ هنگامی‌که انرژی ازیك صورت‌به‌صورت دیگر تبدیل می‌شود مقدارآن همواره ثابت می‌ماند،

۲ـ انرژی از هیچ به‌وجود نمی‌آید و از بین هم نمی‌رود.

۳ـ انرژی کل موجوددرجهان‌همواره‌ثابت است.

می‌دانیم انرژی به‌صورتهای گوناگون ظاهر می‌گردد که‌مهمترین‌آنها عبارتندازانرژیهای‌مکانیکی، الکتریکی، شیمیائی، گرمائی، نورانی، اتمی، ملکولی و هسته‌ای. درباره تبدیل این انرژیها به یکدیگر تاکنون مطالبی به‌اختصار آموخته‌اید. دراین‌جا ما قانون بقای انرژی مکانیکی رامورد بررسی دقیقتری قرار خواهیم داد ودربارهٔ قانون بقای‌اقسام دیگر انرژی هرجا که لازم‌شد به‌بحث خواهیم پرداخت.

بقای انرژی مکانیکی در یك دستگاه منفرد[1]ـ

گفتیم‌مجموع‌انرژیهای‌پتانسیل‌وجنبشی‌موجود در یك‌جسم (یایك دستگاه) را انرژی مکانیکی کل آن جسم (یا آن دستگاه) گویند.

$$E = E_p + E_c \quad \text{انرژی مکانیکی کل} \qquad (۱۸-۸)$$

انرژیهای پتانسیل و جنبشی قابل تبدیل به یکدیگر هستند. درصورتی‌که دستگاه منفرد باشد یابه‌عبارت دیگر ، نیروئی از خارج برآن وارد نشود ، کاهش یکی ازاین دونوع انرژی درست برابرافزایش نوع دیگر است، درنتیجه مجموع این دوانرژی همواره ثابت می‌ماند. برای روشن شدن مطلب به‌بیان چند مثال می‌پردازیم:

مثال ۱ ـ سقوط آزاد یك جسم ـ در نظر بگیریم که سنگی به جرم m ازارتفاع h بالای‌سطح زمین (سطح مبدأ) بدون تندی اولیه سقوط می‌کند واصطکاك هوا درمقابل حرکت آن ناچیز است. در این مثال مجموعه سنگ وزمین را می‌توانیم درحکم یك دستگاه منفرد بگیریم‌که نیروئی ازخارج (مانند نیروی اصطکاك) برآن وارد نمی‌شود.

درلحظهٔ شروع حرکت، انرژی جنبشی سنگ صفر وانرژی پتانسیل آن mgh است و داریم:

$$E_1 = mgh + 0 = mgh \quad \text{انرژی مکانیکی کل اولیه}$$

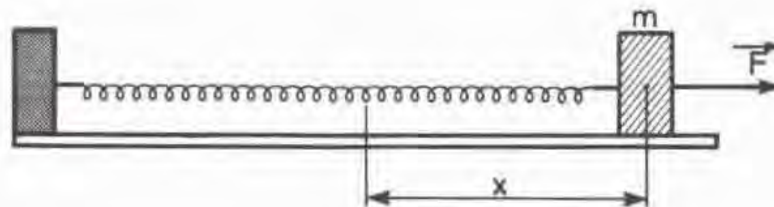
به‌تدریج که سنگ به‌سطح زمین نزدیك می‌شود انرژی‌پتانسیل‌آن‌کاهش می‌یابد ولی درعوض‌انرژی جنبشی‌آن زیاد می‌گردد ولی چون انرژی به‌صورت دیگری تلف نمی‌شود، میزان کاهش انرژی‌پتانسیل ($-\Delta E_p$) درهرلحظه برابر میزان افزایش انرژی جنبشی ($+\Delta E_c$) است . موقعی که جسم به سطح زمین می‌رسد انرژی پتانسیل آن صفر می‌شود ولی انرژی جنبشی آن $\frac{1}{2}mv^2$ می‌گرددو چون $v^2 = 2gh$ است (به‌بخش دوم سقوط‌آزاد اجسام مراجعه شود) داریم :

$$E_2 = 0 + \frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad \text{انرژی مکانیکی کل درسطح زمین}$$

اگرسنگ در راستای‌قائم‌به‌طرف‌بالاپرتاب‌شود انرژی جنبشی اولیه آن به انرژی پتانسیل تبدیل می‌گردد و در هرنقطه از مسیر، میزان‌کاهش انرژی

---

[1] ـ یك دستگاه را ازلحاظ مکانیکی درصورتی منفردگویندکه برآن هیچ نیروئی ازخارج وارد نشود.



شکل ۸–۹ انرژی پتانسیل الاستیك فنر به انرژی جنبشی وزنه m تبدیل می‌شود.

جنبشی برابر میزان افزایش انرژی پتانسیل است. بنابراین برای سنگی که به‌طور آزاد سقوط می‌کند ویا به‌طرف بالا پرتاب می‌شود (در صورتی که نیروی خارجی مانند اصطکاك هوا برآن اثر نکند) قانون بقای انرژی مکانیکی صادق است و داریم :

$$\Delta(E_p) = -\Delta(E_c)$$

یا

$$\Delta(E_p) + \Delta(E_c) = 0$$

این رابطه را به‌صورت زیر نیز می‌توان نوشت :

$$\Delta(E_p + E_c) = 0$$

و یا :

$$\boxed{E_p + E_c = cte} \qquad (۱۹-۸)$$

پرسش ۸–۹ ـ اگر جسمی که سقوط می‌کند یك گلوله از جنس فولاد یا عقیق باشد و در روی زمین به‌یك صفحه سخت وصیقلی و تغییر شکل‌ناپذیر برخوردکند به‌طوری که دراین برخورد اتلاف‌انرژی خیلی‌کم باشد، انرژی جنبشی گلوله پس ازبرخورد به‌چه‌صورت ظاهر می‌شود ؟

مثال ۲ـ انرژی‌کشسانی (الاستیك) ـ قانون بقای انرژی مکانیکی را می‌توان درمورد تبدیل انرژی پتانسیل‌کشسانی یك فنر به انرژی جنبشی و بالعکس نیز به‌کار برد :

به‌سر آزاد یك‌فنر افقی‌که سردیگر آن به‌نقطه‌ای بسته شده است وزنه‌ای به جرم m که روی سطح افقی بدون اصطکاکی قرار دارد وصل‌کرده و بااعمال نیروی $\vec{F}$ وزنه را به‌اندازه x به‌طرف راست انتقال می‌دهیم (شکل ۸–۹) .

چون سنگینی وزنه باعکس‌العمل سطح خنثی می‌شود، دراین حرکت مؤثرنیست وکاری‌که نیروی F درتغییرمکان x انجام می‌دهد به صورت انرژی پتانسیل‌کشسانی $E_p = \frac{1}{2}kx^2$ در دستگاه ذخیره می‌شود . هرگاه وزنه رها شود چون فنر می‌خواهد به وضع اولیه خود برگردد آن را به سمت چپ می‌کشد وهنگامی‌که وزنه از وضع تعادل اولیه خود می‌گذرد دارای سرعت V و درنتیجه انرژی جنبشی $\frac{1}{2}mv^2$ است وچون بنابه‌فرض، انرژی به‌صورت دیگر تلف نمی‌شود کاهش انرژی پتانسیل کشسانی فنر برابر افزایش انرژی جنبشی وزنه است . وزنه در اثر انرژی جنبشی‌که‌کسب کرده است به حرکت خود در طرف چپ ادامه می‌دهد و فنر را متراکم می‌کند تااین که انرژی جنبشی $\frac{1}{2}mv^2$ دوباره تبدیل به انرژی پتانسیل کشسانی $\frac{1}{2}kx^2$ بشود واین تبدیلها مرتباً تکرار می‌گردد. بدیهی است در عمل‌مقداری ازانرژی صرف‌غلبه براصطکاك‌می‌شود و به‌گرما تبدیل می‌گردد .

مثال ۳- سطح شیب دار - درنظر بگیریم که یک اتومبیل کوچک (ازنوع اسباب بازی) به جرم m مطابق شکل (۸-۱۰) روی سطح شیب داری که اصطکاک آن ناچیز است تا ارتفاع h بالا کشیده می‌شود. کاری که صرف بالابردن این اتومبیل می‌شود چنان که گفتیم به صورت انرژی پتانسیل جاذبه‌ای mgh درآن ذخیره می‌گردد. اگر این اتومبیل را بدون سرعت اولیه از بالای سطح شیب‌دار رها کنیم درامتداد سطح پائین می‌آید و چون اصطکاک درکار نیست کاهش انرژی پتانسیل آن در هر لحظه برابر افزایش انرژی جنبشی آن است.

اگر سرعت اتومبیل در پائین سطح v باشد انرژی جنبشی آن $\frac{1}{2}mv^2$ است و باتوجه به قانون بقای انرژی داریم:

انرژی مکانیکی کل درپایین سطح = انرژی مکانیکی کل دربالای سطح

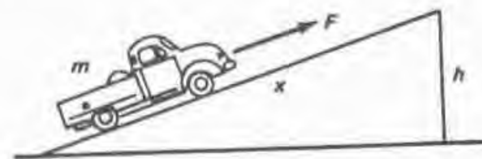
یا:
$$mgh + 0 = 0 + \frac{1}{2}mv^2$$

ویا:
$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

و ازآن جا:
$$v^2 = 2gh$$

یا:
$$v = \sqrt{2gh}$$

رابطهٔ $v = \sqrt{2gh}$ چنان که می‌دانیم معرف سرعت جسمی است که ازارتفاع h بدون سرعت اولیه به‌طور



شکل ۸-۱۰- بقای انرژی مکانیکی

آزادسقوط می‌کند. بنابراین اگر اصطکاک ناچیز باشد سرعت نهائی جسمی که از بالای یک سطح شیب‌دار از ارتفاع h به راه می‌افتد و به پائین سطح می‌رسد برابر سرعت جسمی است که به طور آزاد از ارتفاع h بدون سرعت اولیه در راستای قائم سقوط می‌کند و این سرعت بستگی به زاویه شیب سطح ندارد. اگر این اتومبیل پس از رسیدن به پائین سطح در امتداد سطح شیب دار دیگری که اصطکاک آن هم ناچیز باشد بالا برود انرژی جنبشی آن دوباره به انرژی پتانسیل جاذبه‌ای تبدیل می‌شود و روی سطح دوم با ارتفاع h بالا می‌رود.

بقای انرژی مکانیکی دردستگاه غیرمنفرد- رابطهٔ (۸-۱۹) قانون بقای انرژی مکانیکی را برای دستگاه مکانیکی منفرد بیان می‌کند. اگر دستگاه از لحاظ مکانیکی منفرد نباشد یا به‌عبارت دیگر، از خارج برآن نیرو وارد شود، انرژی مکانیکی آن ثابت نمی‌ماند. مثلا اگر درمثالهای سه‌گانه بالا اصطکاک درکار باشد قسمتی از انرژی دستگاه صرف غلبه براصطکاک می‌شود در نتیجه انرژی مکانیکی ابتدائی دستگاه با انرژی مکانیکی انتهائی آن یکی نیست وتغییر این انرژی برابر کار نیروی اصطکاک است یعنی:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = W_f \qquad (۸-۲۰)$$

دراین رابطه چون E_2 معمولا کمتر از E_1 است W_f منفی بوده و معرف کار مقاوم است وبه‌صورت گرما ظاهر می‌شود.

مثال- یک قطعه فلز به جرم ۰/۵ کیلوگرم ازبالای سطح شیب داری که زاویه شیب آن نسبت به سطح افق °۳۰ است بدون سرعت اولیه رها می‌شود

وپس ازپیمودن مسافت ۲/۰ متر باسرعت ۳/۰ متر برثانیه به‌پایین سطح می‌رسد .

الف ـ نیروی اصطکـاك و ضریب اصطکاك لغزشی سطح را حساب کنید .

ب ـ مقدار گرمائی که در اثر اصطکاك تولید می‌شود برحسب ژول وکالری چه اندازه است؟

ـ الف) ـ اگر $E_۱$ و $E_۲$ به ترتیب انرژی مکانیکی این‌قطعه فلز در بالا و پائین سطح شیب دار و f نیروی اصطکاك و d مسافت پیموده شده روی سطح شیب دار باشد طبق رابطه (۸ـ۲۰) خواهیم داشت :

$$E_۲ - E_۱ = f.d$$

ولی

دربالای‌سطح $E_۱ = E_{P_۱} + E_{C_۱} = mgh + ۰ = mgh = mgd\sin\theta$

درپایین سطح $E_۲ = E_{P_۲} + E_{C_۲} = ۰ + \frac{۱}{۲}mv^۲ = \frac{۱}{۲}mv^۲$

بنابراین : $\frac{۱}{۲}mv^۲ - mgd\sin\theta = f.d$

به ازای

$m = ۵kg$

$d = ۲m$

$v = ۳m/s$

$\theta = ۳۰°$ ($\sin ۳۰° = \frac{۱}{۲}$ و $\cos ۳۰° = \frac{\sqrt{۳}}{۲} \approx ۰/۸۶۵$)

خواهیم داشت :

$$\frac{۱}{۲} \times ۵ \times ۳^۲ - ۵ \times ۹/۸۰ \times ۲ \times \frac{۱}{۲} = f \times ۲$$

یا : $۲۲/۵ - ۴۹ = f \times ۲$

و یا : $f = \frac{۲۲/۵ - ۴۹}{۲} = -۱۳/۲۵N$

علامت (ـــ) معرف نیروی مقاوم است . ضریب اصطکاك چنان‌که می‌دانیم برابر است با :

$$\mu = \frac{|f|}{N} = \frac{|f|}{mg\cos\theta} = \frac{۱۳/۲۵}{۵ \times ۹/۸۰ \times ۰/۸۶۵} \approx ۰/۳۱$$

ـ ب) ـ کار نیروی اصطکاك به‌گرما تبدیل می‌شود. بنابراین گرمای حاصل برحسب ژول برابر است با :

$$Q = W_f = f.d = ۱۳/۲۵N \times ۲m = ۲۶/۵J$$

چون هر کالری معادل ۴/۱۸۵ ژول (تقریباً ۴/۲ ژول) است مقدار Q برحسب کالری برابراست با:

$$Q = \frac{۲۶/۵}{۴/۱۸۵} \approx ۶/۳cal$$

تبدیل انرژیهای گرمایی ومکانیکی به‌یکدیگر

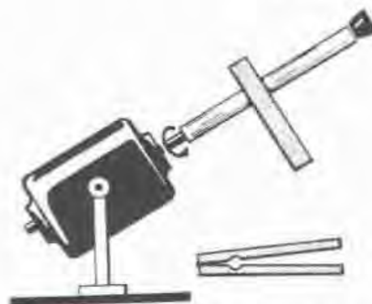
در مثالهای پیش دیدیم که قسمتی از انرژی جنبشی یك‌جسم یایك دستگاه متحرك دراثر اصطکاك به گرما تبدیل می‌شود. پدیده‌های گرمایی ومکانیکی در اغلب موارد سخت به هم مرتبط بوده و قـابل تفکیك نیستند. مثلا ازمالش دوقطعه چوب به‌یکدیگر گرماتولیدمی‌شود به‌طوری که‌می‌توان آتش‌افروخت.

یك گلوله سربی کـه با سرعت زیاد به مـانع سختی برخوردکرده ومتوقف می‌شود انرژی جنبشی آن‌به گرما تبدیل می گردد وگرمای‌حاصل‌ممکن‌است آن را ذوب‌کند . همه می‌دانیم هنگامی‌کـه قطعات فلزی یاچوبی را باره می‌برند یاسوهان می‌زنند گرما تولید می‌شود و مثالهای بیشمار دیگر ...

تبدیل گرما به‌انرژی مکانیکی قدری مشکلتر است و این تبدیل چنان که می‌دانید در ماشینهای گـرمایی برون سوز و درون سوز مانند ماشینهای

بخار، توربینهای بخار، موتورهای انفجاری و دیزل و ... صورت می‌گیرد. بایك آزمایش ساده‌می‌توان در آزمایشگاه تبدیل انرژیهای مکانیکی و گرمائی را به یکدیگر نشان داد:

لوله برنجی در شکل (۸-۱۱) که محتوی مقداری اتر است با چوب پنبه‌ای بسته شده و روی محور یك موتور الکتریکی سوار است و می‌چرخد. هر گاه به وسیله گیرهٔ چوبی که در شکل نشان داده شده است بدنهٔ لوله را محکم بگیریم گرمای حاصل از کارنیروی اصطکاك بین گیره و لوله، اتر را بخار می‌کند وفشار بخار اترچوب پنبه‌را بهشدت به‌طرف بالا پرتاب می‌نماید.



شکل ۸-۱۱-گرمای حاصل از اصطکاك، اتر را بخار می‌کند و فشار بخار اتر چوب پنبه را پرتاب می‌نماید.

هم ارزی کار وگرما - مقادیرکار و گرمایی راکه باهم مبادله می‌شوند می‌توان جداگانه اندازه گرفت و رابطهٔ بین‌آنها را معین‌کرد. تحقیق تجربی رابطه بین‌کار وگرما نخستین بار توسط ژول (که با نام او آشنا هستید) صورت‌گرفته است. آزمایش نشان‌می‌دهد‌که اگر کار W کاملا صرف تولیدگرمای Q شود نسبت $\frac{W}{Q}$ همواره مقدارثابتی است که‌فقط بستگی به واحدهای W و Q دارد. این مقدار ثابت را به j نمایش می‌دهند وآن را «معادل مکانیکی واحدگرما» می‌نامند، بنابراین:

$$\boxed{\frac{W}{Q}=J} \qquad (۸-۲۱)$$

اگر W و Q هردو برحسب ژول بیان شوند $j=۱$ است. به عبارت دیگر یك ژول‌کار معادل یك ژول گرما است، ولی اگر W برحسب ژول و Q برحسب کالری بیان شود $j=۴/۱۸۵ \frac{ژول}{کالری}$ است، یعنی برای تولید یك کالری گرما ۴/۱۸۵ ژول‌کار لازم است، یا به‌عبارت دیگریك‌کالری‌گرما معادل ۴/۱۸۵ ژول و یا یك‌کیلوکالری‌گرما معادل ۴۱۸۵ ژول‌کار است.

اصل هم‌ارزی‌کار وگرما - نتایج بالا را با استفاده از قانون بقای انرژی می‌توان تحت عنوان اصل هم‌ارزی‌کار وگرما به‌صورت زیر بیان‌کرد:

«هرگاه در دستگاهی فقط مبادلهٔ کار و گرما صورت گیرد و دستگاه پس از مبادله کار وگرما انرژی اولیه خود را باز یابد (به‌عبارت دیگر به‌حالت اولیه خودبرگردد) اگر این دستگاه‌کار بگیردگرما پس‌می‌دهد و اگر گرما بگیرد کار پس‌می‌دهد و درهردوحال‌میان کار W و گرمای Q مبادله شده نسبت ثابتی برقرار است.»

اگر بنا به قرار داد، کار یاگرمایی را که به دستگاه داده می‌شود با علامت مثبت وگرما باکاری را که از دستگاه‌گرفته می‌شود باعلامت منفی درنظر بگیریم اصل هم‌ارزی‌کار وگرما به‌صورت زیرنوشته می‌شود:

$$W+Q=0 \qquad (۲۲-۸)$$

دراین رابطه W و Q هردوبرحسب ژول هستند.

در صورتی که دستگاه منفرد نباشد ، یعنی با محیط خارج مبادله انرژی کند انرژی‌کل آن ثابت نمی‌ماند ولی میزان تغییر انرژی کل دستگاه برابر مجموع جبری‌کار وگرمایی است‌که دستگاه بامحیط خارج مبادله می‌کند یعنی:

$$\Delta E = W+Q \quad \text{تغییر انرژی‌کل دستگاه}$$

(۲۳-۸)

اگر دستگاه از محیط خارج‌کار وگرما بگیرد انرژی کل داخلی آن افزایش می‌یابد و اگربه‌محیط خارج هم‌کار و هم‌گرما بدهد انرژی کل درونی آن کاهش می‌یابد. بدیهی‌است اگردستگاه بامحیط خارج‌مبادله انرژی نکند $\Delta E=0$ است و رابطه (۸-۲۲) به دست می‌آید .

رابطهٔ (۸-۲۳) درواقع صورت‌کلی‌تری‌ازبیان قانون‌بقای انرژی‌است وبه‌نام‌اصل‌اول‌ترمودینامیك نیز نامیده می‌شود .

قانون بقای اندازه حرکت

قانون بقای اندازه‌حرکت نیز مانند قانون بقای انرژی یکی ازقوانین مهم واساسی مکانیك است و می‌توان آن را درباره اجسام یا دستگاههای منفرد و غیر منفرد به‌کار برد.

اگر دستگاه از لحاظ مکانیکی منفرد باشد و نیروئی ازخارج برآن اثرنکند اندازه حرکت‌کل آن همواره ثابت می‌ماند ، ولی اگر دستگاه از لحاظ مکانیکی منفرد نباشد و نیروی خارجی $\vec{F}$ در زمان Δt برآن اثرکند اندازه حرکت کل دستگاه تغییر می‌نماید ومقدار تغییرآن، چنان‌که دربخش ۳ دیدیم برابر $\vec{F}.\Delta t$ است یعنی

$$\vec{F}.\Delta t=\Delta(m\vec{v})$$

مثلا اگرجسمی به‌جرم m که آن‌را ثابت می‌گیریم درمدت Δt ثانیه تحت تأثیرنیروی ثابت خارجی F قرارگیرد وتندی آن دراین مدت از $\vec{v}_1$ به $\vec{v}_2$ برسد اندازه حرکت‌آن از $m\vec{v}_1$ به $m\vec{v}_2$ می‌رسد و داریم :

$$\vec{F}\Delta t=\Delta(m\vec{v})=m.\Delta\vec{v}=m\vec{v}_2-m\vec{v}_1$$

ولی اگر نیرویی از خارج برجسم وارد نشود یعنی $\vec{F}=0$ باشد، ضربه $\vec{F}.\Delta t$ نیز صفر است و داریم:

$$0=m\vec{v}_2-m\vec{v}_1$$

یا

$$m\vec{v}_2=m\vec{v}_1=Cte$$

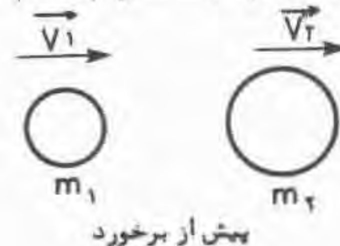
برخورد دو یا چند جسم به یکدیگر و یا تغییرات درونی یك‌دستگاه ازجمله مواردی هستندکه‌می‌توان قانون بقای اندازه حرکت رادربارهٔ آنها به کار برد و این قانون دربارهٔ همه برخوردها ، چه برخورد اجسام بسیار بزرگ مانندا‌جرام سماوی وچه‌برخورد اجسام بسیارکوچك مانند اتمها ، صادق است

برخوردها وبقای اندازه حرکت- وقتی‌که‌دوجسم منفرد به هم برخورد می‌کنند هر یك از آن دوجسم در لحظهٔ برخورد بردیگری نیرویی وارد می‌سازدکه سبب تغییر اندازه حرکت آن می‌شود. چون بنا به قانون عمل و عکس‌العمل نیروهایی که دو جسم در لحظهٔ برخورد بریکدیگر وارد می‌سازند مساوی و درجهت مخالف یکدیگرند، ضربه‌های مؤثردوجسم

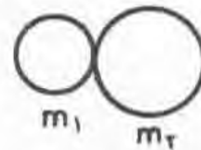
بریکدیگر نیز مساوی و در خلاف جهت هم وارد می‌شوند بنابراین تغییراندازه حرکت آن دوجسم از لحاظ برداری مساوی و مختلف‌الجهت هستند.

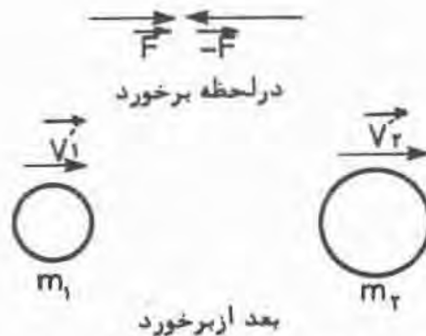
مثلا در نظر بگیریم دوجسم به‌جرمهای m_1 و m_2 که تندی آنها پیش از برخورد به ترتیب $\vec{v}_1$ و $\vec{v}_2$ است به هم برخورد می‌کنند و تندی آنها پس ازبرخورد $\vec{v'}_1$ و $\vec{v'}_2$ می‌شود (شکل ۸-۱۲) اگر مدت برخورد Δt باشد بنا برآنچه در بالا بیان شد داریم:

$$(m_1\vec{v'}_1 - m_1\vec{v}_1) = -(m_2\vec{v'}_2 - m_2\vec{v}_2)$$



پیش از برخورد





درلحظه برخورد

بعد ازبرخورد

شکل ۸-۱۲ درغیاب نیروی خارجی اندازه حرکت‌کل دوجسم پیش از برخورد برابر اندازه حرکت‌کل دو جسم بعد از برخورد است.

و یا

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v'}_1 + m_2\vec{v'}_2 \qquad (24\text{-}8)$$

یعنی:

اندازه حرکت کل دستگاه پس از برخورد = اندازه حرکت کل دستگاه پیش ازبرخورد

رابطه (۸-۲۴) نشان می‌دهد که اگر بردستگاهی از خارج نیرو اثرنکند اندازه حرکت کل دستگاه همواره ثابت می‌ماند.

مثال ۱ - گلوله‌ای به‌جرم ۵/۰kg که باتندی ۲۰/۰ $\frac{m}{s}$ درامتدادیک خطراست برسطح افقی بدون اصطکاك حرکت می‌کند به گلوله دیگری به جرم ۱۰/۰kg که با تندی ثابت ۱۰/۰ $\frac{m}{s}$ در همان امتداد ودر جهت حرکت گلوله اولی درحرکت است برخورد می‌کند. گلوله اولی پس از برخورد، در همان جهت حرکت پیشین خود با تندی ۸/۰ $\frac{m}{s}$ به حرکت خود ادامه می‌دهد. تندی گلوله دوم را حساب کنید.

- چون نیرویی از خارج بردستگاه دوگلوله واردنمی‌شود طبق قانون بقای اندازه حرکت داریم:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v'}_1 + m_2\vec{v'}_2$$

وچون تندیها دریك راستا هستند رابطهٔ برداری بالا به‌صورت رابطهٔ جبری زیرنوشته می‌شود:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2$$

به ازاء $m_1 =$ ۵/۰kg و $m_2 =$ ۱۰/۰kg

و $v_1 =$ ۲۰/۰ $\frac{m}{s}$ و $v_2 =$ ۱۰/۰ $\frac{m}{s}$

و $v'_1 = 8/0\,\frac{m}{s}$ خواهیم داشت :

$$(5/0 \times 20/0) + (10/0 \times 10/0) = (5/0 \times 8/0) + (10/0 \times v'_2)$$

یا

$$200 = 40 + 10v'_2$$

$$v'_2 = \frac{160}{10} = 16/0\,\frac{m}{s}$$

یعنی جسم m_2 پس از برخورد، با تندی ۱۶/۰m/s درجهت حرکت پیشین خود به‌حرکت ادامه می‌دهد.

در این مثال انرژی جنبشی دستگاه ، پیش از برخورد وپس ازبرخورد یکی نیست زیرا

$$E_c = \left(\frac{1}{2} \times 5 \times 20^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 10 \times 10^2\right)$$

پیش از برخورد $= 1500\ j$

$$E_c = \left(\frac{1}{2} \times 5 \times 8^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 10 \times 16^2\right)$$

پس از برخورد $= 1440\ j$

تفاوت این انرژیها که ۶۰ ژول‌است درجریان برخورد به صورت انرژی گرمایی تلف می‌شود زیرا در مدتی کـه برخورد طول می‌کشد در اثر نیروی متقابلی کـه دو جسم به هم وارد می‌سازند ، محل برخوردشان اندکی تغییر شکل می‌یابد و مقدار کمی گرما تولید می‌شود. گرمای حاصل دمای هردو جسم را بالا می‌برد. بدیهی است دراین مثال برای نوشتن قانون بقای انرژی باید این ۶۰ ژول انرژی گرمائی درنظر گرفته شود .

باید درنظرداشت که نیروهای بین اجزائی که یك دستگاه مادی را تشکیل می‌دهند نیروهای داخلی هستند و این نیروها همواره به‌صورت جفت متقابل اثر می‌کنند و چنان که گفتیم هریك از این جفت نیروها، ضربه‌های متقابل (مساوی و درجهت مخالف) وارد می‌سازند به‌طوری‌که اندازه‌حرکت‌کل دستگاه‌نمی‌تواند در اثر این نیروها تغییر کند و ثابت می‌ماند.

مثال ۲ ـ در شکل ۸ـ۱۳ آزمـایش جالبی برای نشان دادن قانون بقای اندازه حرکت مجسم شده است . این آزمایش را می‌توان با شش یا هفت گلوله فـولادی یا شیشه‌ای یکسان درشیار صاف و سرتاسری یك تخته افقی انجام داد : گلوله‌ها را در شیار تخته کنارهم دریك ردیف طوری قرار می‌دهیم که باهم در تماس باشند هرگاه یکی‌از آنها رااز‌بقیه کمی دورکرده و آن را بایك ضربه کوتاه به حرکت درآوریم تا به گلوله‌های دیگر برخورد کند این گلوله پس ازبرخورد متوقف می‌شود و تنها گلوله انتهایی ردیف ، با همان سرعت برخورد از گلوله‌های دیگر دور می‌گردد.

اگر آزمایش را با دو یا سه گلوله باهم تکرار کنیم دو یا سه گلوله ازانتهای ردیف باهمان سرعت برخورد دور می‌شوند . در این جا ممکن است این پرسش مطرح شود :

وقتی‌دو گلوله باهم به گلوله‌های دیگر برخورد کرده ومتوقف می‌شوند چرا برای ثابت ماندن اندازه حـرکت ، فقط یك گلوله از انتهای ردیف با سرعت



شکل ۸ـ۱۳ـ با چند گلوله شیشه‌ای یا فولادی می‌توان قانون بقای اندازه حرکت را نشان داد.

مضاعف از بقیه جدا نمی‌شود؟

پاسخ این پرسش به‌کمك قانون‌بقای انرژی داده می‌شود، زیرا اگر در مقابل برخورد دوگلوله به‌گلوله‌های دیگر، فقط یك گلوله از انتهای ردیف با سرعت دو برابر جدا شود درست است که اندازه حرکت کل دستگاه ثابت می‌ماند ولی انرژی جنبشی این گلوله دوبرابر انرژی‌جنبشی دوگلوله دربرخورد نخستین است واین باقانون‌بقای انرژی مغایرت‌دارد.

برخورد الاستیك وبرخورد غیر الاستیك ــ اگر در برخورد دو یا چند جسم به‌یك‌دیگر، انرژی جنبشی کل، پیش از برخورد و بعد از برخورد ثابت بماند برخورد را الاستیك گویند ولی اگر ضمن برخورد، انرژی جنبشی کاهش یابد برخورد را غیرالاستیك نامند. چنان‌که دو جسم پس از برخورد، به‌یکدیگر بچسبند برخورد را غیرالاستیك کامل گویند مانند گلوله‌ای‌که به‌یك‌کیسه ماسه می‌خورد و درآن فرو می‌رود و متوقف می‌شود.

آزمایش نشان می‌دهد که اجسام سخت، «جهندگی» (یا قابلیت ارتجاعی) بیشتری دارند و هنگام برخورد، به سرعت از یکدیگر جدا می‌شوند ولی اجسام نرم جهندگی‌کمتری دارند و در موقع برخورد به‌کندی ازهم جدامی‌گردند به‌عبارت دیگر، سرعت جدا شدن دوجسم از یکدیگر به‌هنگام برخورد، بستگی به درجه سختی آنها دارد.

جهندگی (یا قابلیت ارتجاع) بنا به تعریف عبارتست از توانایی که جسم در تحمل فشار یا تغییر شکل ناگهانی از خود نشان می‌دهد بدون آن که تغییر شکل دائمی پیدا کند.

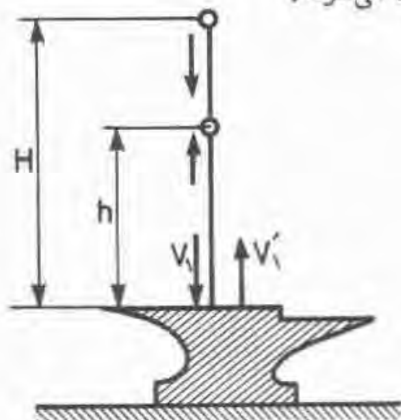
برای رده‌بندی اجسام‌برحسب درجه‌جهندگی، ضریبی به‌نام «ضریب جهندگی» (یاضریب قابلیت ارتجاع) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{ضریب جهندگی} = \frac{\text{تندی جدا شدن پس از برخورد}}{\text{تندی نزدیك‌شدن پیش‌از برخورد}} \qquad (\text{۸-۲۵})$$

مثلا در برخورد دوگلوله درشکل (۸-۱۲) ضریب جهندگی(که‌آن‌را به r نمایش می‌دهیم) برابراست‌با:

$$r = \frac{V'_2 - V'_1}{V_1 - V_2} \qquad (\text{۸-۲۶})$$

ساده‌ترین روش برای تعیین ضریب جهندگی در شکل ۸-۱۴ نشان داده شده است. در این روش گلوله‌هائی از جنس مواد مختلف را از یك ارتفاع معین از بالای سطح صاف و سخت یك جسم بزرگ (مانند یك سندان) بدون سرعت اولیه رها می‌کنند و ارتفاع برگشت آنها را اندازه می‌گیرند. آزمایش نشان می‌دهدکه‌برخلاف انتظار، گلوله‌های شیشه‌ای وفولادی بیش ازگلوله‌هائی‌که ازبهترین نوع‌لاستیك ساخته می‌شوند به طرف بالا برمی‌گردند. گلوله سربی پس ازبرخورد خیلی‌کم برمی‌گردد و تقریباً متوقف می‌شود.



شکل ۸-۱۴ــ آزمایش برای تعیین ضریب جهندگی اجسام

درشرایط این آزمایش v_2 صفر است زیرا جسم دوم ساکن است. v'_2 نیز به دلیل زیاد بودن جرم این جسم عملا صفر است. اگر گلوله مورد آزمایش از ارتفاع H رها شود وتاارتفاع h برگردد v_1 و v'_1 از روابط زیر حساب می‌شوند:

$$v'_1=\sqrt{2gh} \quad \text{و} \quad v_1=\sqrt{2gH}$$

بنابراین:

$$\boxed{r=\frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}}=\frac{\sqrt{h}}{\sqrt{H}}} \qquad (۲۷-۸)$$

کوچکترین مقدار ضریب جهندگی صفر (برای برخورد غیر الاستیک کامل) و بزرگترین مقدار آن یك (برای برخورد کاملا الاستیک) است در جدول ۸-۱ ضریب جهندگی چند ماده مختلف برای مقایسه داده می‌شود.

جدول ۸-۱-ضریب جهندگی چندماده متفاوت

نوع ماده	ضریب جهندگی (r)
شیشه	۰/۹۷
فولاد	۰/۹۵
عاج	۰/۸۰
آهن	۰/۷۰
چوب افرا	۰/۶۶
چوب پنبه	۰/۶۰
مس	۰/۱۴
سرب	۰/۰۲

برخوردهای روبرو - برخوردهای روبرو به برخوردهایی گفته می‌شود که درآنها راستای حرکت دوجسمی که به‌هم برخورد می‌کنند پیش از برخورد وپس ازبرخورد یکی باشد. اگر برخورد کاملا الاستیك باشد (مانند برخورد ملکولهای گازها) و نیرویی ازخارج براجسام برخورد کننده وارد نشود، علاوه برمحفوظ ماندن اندازه حرکت، انرژی جنبشی کل نیز محفوظ می‌ماند. قانونهای بقای اندازه حرکت وبقای انرژی جنبشی برای چنین برخوردی (با توجه به شکل ۸-۱۲) به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

$$(۲۸-۸)\begin{cases} \text{قانون بقای اندازه حرکت} \\ m_1\vec{v}_1+m_2\vec{v}_2=m_1\vec{v'}_1+m_2\vec{v'}_2 \\ \text{قانون بقای انرژی جنبشی} \\ \frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2=\frac{1}{2}mv'^2_1+\frac{1}{2}mv'^2_2 \end{cases}$$

اگر تندیهای دوجسم برخوردکننده، پیش از برخورد معین باشندبااین دو رابطه‌می‌توان تندیهای آنها را پس از برخورد حساب‌کرد.

باید توجه داشت‌که در برخورد اجسام منفرد، چه الاستیك و چه غیر الاستیك، اندازه حرکت کل همواره محفوظ می‌ماند وقانون بقای اندازه حرکت معتبراست ولی دربرخوردهای غیرالاستیك انرژی جنبشی کل‌محفوظ نمی‌ماند وقانون بقای انرژی جنبشی صدق نمی‌کند. دراین‌گونه برخوردها برای تعیین سرعتها پس‌ازبرخوردمی‌توان ازروابط (۸-۲۴) و (۸-۲۶) استفاده‌کرد.

مثال ۳ - جسمی به‌جرم m_1 باتندی $\vec{v}_1$

به‌جسم دیگری به‌جرم m_2 که ساکن است $(\vec{v_2}=0)$ برخورد می‌کند. اگر برخورد این دو جسم روبرو وکاملا الاستیك باشد ازترکیب رابطه‌های (۸-۲۸) سرعت هریك از دو جسم را پس از برخورد حساب کنید.

- چون برخوردها روبرو هستند راستای حرکت تغییر نمی‌کند و داریم:

$$\begin{cases} m_1v_1+m_2\times 0=m_1v'_1+m_2v'_2 \\ \frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2(0)^2=\frac{1}{2}m_1v'^2_1+\frac{1}{2}m_2v'^2_2 \end{cases}$$

یا

$$\begin{cases} m_1(v_1-v'_1)=m_2v'_2 \\ m_1(v_1^2-v'^2_1)=m_2v'^2_2 \end{cases}$$

از حل این دو معادله با هم نتیجه می‌شود

$$\begin{cases} v'_1=\dfrac{m_1-m_2}{m_1+m_2}v_1 \\ \\ v'_2=\dfrac{2m_1}{m_1+m_2}v_1 \end{cases}$$

این روابط نشان می‌دهندکه اگرجرم دوجسم برابر باشد $(m_1=m_2)$ جسم اول پس ازبرخورد متوقف می‌شود $(v_1'=0)$ وجسم دوم باهمان سرعت جسم اول به‌حرکت درمی‌آید $(v_2'=v_1)$.

اگر $m_1>m_2$ باشد $v_1'>0$ است و هردو جسم پس از برخورد، در جهت حرکت جسم اول حرکت خواهندکرد.

ولی اگر $m_1<m_2$ باشد $v'_1<0$ است و تعبیر علامت منفی این است که جسم اول پس از برخورد، در خلاف جهت حرکت اولیه خود برمی‌گردد. بدیهی است اگر m_2 در مقابل m_1 بسیار بزرگ باشد v'_2 تقریباً صفر و اندازه v'_1 تقریباً برابر اندازه v_1 است.

مثال۴- گلوله‌ای به جرم ۲/۰ کیلوگرم با تندی ۸/۰ متر بر ثانیه به‌گلوله دیگری به جرم ۵/۰ کیلوگرم که با تندی ۱/۰ متر برثانیه درهمان جهت و راستای حرکت‌گلوله اول درحرکت است برخورد می‌کند (برخورد روبرو). اگر ضریب جهندگی دراین برخورد ۰/۹۰ باشد تندی هرگلوله را پس از برخورد حساب‌کنید.

- داریم

$$\begin{cases} m_1v_1+m_2v_2=m_1v'_1+m_2v'_2 \\ r=\dfrac{v'_2-v'_1}{v_1-v_2} \end{cases}$$

و به ازاء $v_1=8/0\frac{m}{s}$ و $v_2=1/0\frac{m}{s}$

و $m_1=2/0kg$ و $m_2=5/0kg$

و $r=0/90$ خواهیم داشت:

$$\begin{cases} 2\times 8+5\times 1=2\times v'_1+5\times v'_2 \\ 0/90=\dfrac{v'_2-v'_1}{8-1}=\dfrac{v'_2-v'_1}{7} \end{cases}$$

و یا

$$\begin{cases} 2v'_1+5v'_2=21 \\ v'_2-v'_1=6/3 \end{cases}$$

از حل این دو معادله باهم نتیجه می‌شود:

$$\boxed{v'_1=-1/5\frac{m}{s}} \quad \text{و} \quad \boxed{v'_2=4/8\frac{m}{s}}$$

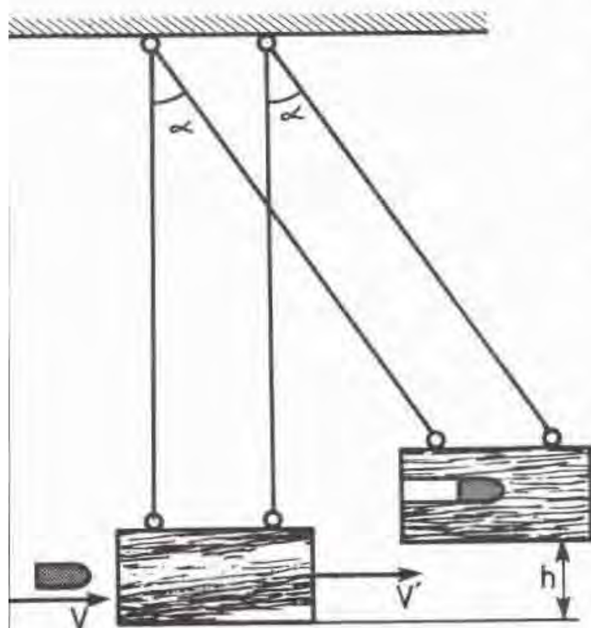
برای‌اطمینان‌ازدرست بودن جوابها کافی است‌آنها را دررابطه قانون‌بقای اندازه حرکت بگذاریم وتساوی دوطرف این رابطه را بررسی کنیم.

مثال ۵ ـ آونگ بـالیستیك و اندازه‌گیری سرعت گلوله تفنگ ـ اصطلاح بالیستیك به‌شاخه‌ای از مکانیك اطلاق می‌شود کـه دربـاره اندازه‌گیری سرعت گلوله‌ها و چگونگی تأثیر آنها بر هدفهای مختلف بحث می‌کند و بحث آن بیشتر دربـارهٔ اندازه‌گیری سرعت گلوله تفنگها است یکی از روشهای متداول اندازه‌گیری سرعت گلوله تفنگ این است که تفنگ را در وضع افقی روی پایه‌ای نصب می‌کنند وقطعه چوب مکعب مستطیل شکل بزرگی را مقابل دهانه لوله تفنگ و خیلی نزدیك به آن ، به وسیله چهار ریسمان دراز هم طول و موازی به‌صورت یك‌آونگ می‌آویزند. گلوله همین که از دهانه تفنگ خارج شد وارد قطعه چـوب می‌شود و درآن جـای می‌گیرد. ضربه گلوله سبب می‌شود که قطعه چوب به عقب رانده‌شود وتاارتفاع معینی بالارود (شکل ۸ـ۱۵) بااندازه‌گیری جرم گلوله وجرم‌قطعه‌چوب وارتفاعی که بالا می‌رود می‌توان سرعت گلوله را هنگام‌خارج شدن از تفنگ حساب‌کرد .

اگر
$m =$ جرم گلوله
$M =$ جرم قطعه چوب
$v =$ سرعت گلوله درلحظهٔ برخوردبه‌قطعه چوب
$v' =$ سرعت عقب رفتن و قطعه چوب در لحظه برخورد گلوله

باشد طبق قانون بقای اندازه حرکت داریم :

$$mv = (M+m)v'$$



شکل ۸ ـ ۱۵ ـ آونگ بالیستیك برای اندازه‌گیری سرعت گلوله تفنگ

اگر h بیشتریـن ارتفاعی باشد کـه قطعه چوب و گلوله درون آن پس از برخورد بالامی‌رود با توجه به قانون‌بقای انرژی مکانیکی

$$\left(\frac{1}{2}(M+m)v'^2 = (M+m)gh \quad \text{یعنی}\right)$$

خواهیم داشت :

$$v' = \sqrt{2gh}$$

بنابراین :

$$\boxed{v = \frac{M+m}{m}\sqrt{2gh}} \qquad (۸\text{-}۲۹)$$

خودتان آزمایش کنید

معادل مکانیکی واحد گرما را با یك آزمایش ساده به‌دست آورید:

وسائل لازم : یك لوله شیشه‌ای نسبتاً ضخیم ومحکم تقریباً به‌قطر ۵ سانتیمتر وبه طول ۱ متر که هردو سرآن باز است،

مقداری ساچمه سربی (مثلا ۱۰۰ گرم)،

دوقطعه چوب پنبه(معمولی یا لاستیکی برای بستن دوسرلوله)،

یك دماسنج جیوه‌ای معمولی،

یك بشر یا یك استکان کوچك.

دماسنج را دروسط بشر کوچك (یا استکان) نگاه دارید وساچمه‌ها را به‌آرامی اطراف‌آن بریزید تا مخزن دماسنج وسط آنها قرار گیرد (مواظب باشید ساچمه‌ها به مخزن دماسنج ضربه وارد نسازند که سبب شکستن آن بشوند) و دمای اولیه ساچمه ها را اندازه بگیرید و یادداشت کنید (θ_1) .

یك سرلوله را باچوب پنبه محکم ببندید و ساچمه‌ها را درآن بریزید سپس سردیگر لوله را با چوب‌پنبه دیگر محکم ببندید به طوری‌که چوب پنبه‌ها در اثر ضربه ساچمه‌ها باز نشوند . لوله را با دست در راستای قائم نگاه دارید (شکل ۸-۱۶) و به‌سرعت آن را واژگون کنید تا ساچمه‌ها ازیك سرلوله به‌سردیگرآن سقوط‌کنند. بدیهی است ارتفاع سقوط ساچمه‌ها برابرطول لوله (فاصله دو چوب‌پنبه) است. عمل واژگون‌کردن لوله را از ۵۰تا۲۰۰بار به‌سرعت وپشت سرهم تکرارکنید سپس‌بلافاصله‌یکی ازچوب‌پنبه‌ها را بردارید ومانند حالت اول دمای ساچمه‌ها را اندازه بگیرید ویادداشت کنید (θ_2). این دما بیشتر ازدمای اولیه θ_1 است .



شکل ۸-۱۶

اگر m جرم ساچمه‌ها و h ارتفاع سقوط آنها درلوله (فاصله بین دو چوب‌پنبه) باشد کار انجام شده در اثر سقوط ساچمه‌ها در n بار سقوط پیاپی برابر است با :

$$W = mg\ .\ nh$$

این کار به گرما تبدیل شده ودمای ساچمه‌ها را بالا می‌برد . اگر c ظرفیت گرمایی ویژه سرب باشد مقدار گرمایی که سبب بالا رفتن دمای m گرم سرب از θ_1 به θ_2 می‌شود برابر است با :

$$J = \frac{W}{Q} = \frac{mg.nh}{mc(\theta_2 - \theta_1)}$$

یا

$$J = \frac{g.nh}{c(\theta_2 - \theta_1)}$$

باتوجه به‌این‌که ظرفیت گرمایی ویژه سرب $130 \frac{\text{ژول}}{\text{کیلو گرم . درجه}}$ (یا $0/031 \frac{\text{کالری}}{\text{گرم . درجه}}$) است J را حساب‌کنید. آزمایش را چند بار تکرارکنید ومیانگین نتایج حاصل را به‌دست‌آورید .

به این پرسشها پاسخ دهید

۱) ـ با صرف یك ژول انرژی کتابی به‌جرم یك‌کیلوگرم را تاچه ارتفاعی ازسطح یك‌میز می‌توان در راستای قائم بالا برد ؟

۲) ـ چند ژول انرژی لازم است تایك هواپیمای جت که وزن آن با بار 7×10^5 نیوتن است (وثابت فرض می‌شود) تاارتفاع ده‌کیلومتری سطح زمین بالا برود؟

۳) ـ با رسم یك نمودار نشان دهیدکه کار نیروی کشسانی یك فنر برابر سطح محصور بین خط نمایش $F = kx$ ومحور نمایش x هاست.

۴) ـ با توجه به‌این‌که اندازه حرکت یك جسم به جرم m که با تندی $\vec{v}$ حرکت می‌کند برابر $\vec{p} = m\vec{v}$ است نشان دهیدکه بین اندازه حرکت $\vec{p}$ و انرژی جنبشی E_c جسم‌رابطهٔ زیر برقرار است .

$$E_c = \frac{1}{2}\frac{p^2}{m}$$

۵) ـ با استفاده ازقانون بقاء انرژی نشان دهیدکه اگر آونگ ساده‌ای (گلوله کوچکی که به نخ سبکی از یك نقطه آویزان است) را به اندازه زاویه θ از وضع تعادل منحرف‌کرده بدون سرعت اولیه رهاکنیم درصورتی‌که اصطکاك ناچیز باشد سرعت‌گلوله آن به هنگام عبور

از راستای قائم برابر است با :

$$v = \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)}$$

l طول آونگ یعنی فاصله مرکز ثقل گلوله ازنقطه آویز است .

۶) ــ دو جسم که دارای بار الکتریکی هستند یکدیگر را میرانند برای این که انرژی پتانسیل الکتریکی این دوجسم را افزایش دهیم باید :

۱ــ دوجسم را به موازات هم با یك سرعت حرکت دهیم.

۲ــ یکی ازدوجسم را روی محیط یك دایره بهدور جسم دیگر بچرخانیم.

۳ــ دوجسم را از یكدیگر دورکنیم.

۴ــ دوجسم را به یكدیگر نزدیك کنیم .

درجواب درست بحث کنید .

۷) ــ وقتی که سنگیدرهواسقوط میکند قانونبقایانرژی دربارهٔآن چگونه بیان میشود؟

۸) ــ درمدتیکه یك ماهواره به جرم m با سرعت v یك دور روی مدار دایرهای شکلی به شعاع r بهدور زمین میگردد چهکاری نیروی جاذبه زمین روی آن انجام میدهد؟

۹) ــ باتوجه باینکه انرژی پتانسیل جاذبهای معمولا نسبت به یك سطح مقایسه (سطح انرژی پتانسیل صفر) سنجیده میشود بگوئید سطح مقایسه مناسب در مثالهای زیر کجا باید انتخاب شود؟

الفــ پاندولیکه درحال نوسان است.

بــ وزنهایکه به فنر مارپیچی آویخته شده ودر راستای قائم پائین و بالا میرود.

پــ سیارهایکه بهدور خورشید میچرخد.

۱۰) ــ وقتی یك سفینه فضاییکه دور زمین میگردد ازیك مدار دایرهای شکل بهشعاع بزرگتر به یك مدار دایرهای شکل به شعاع کوچکتر انتقال مییابد.

الفــ انرژی جنبشیآن نسبت به وضعیت اولیه چگونه تغییر میکند (کمتر میشود یا بیشتر) ؟

بــ انرژی پتانسیل جاذبهای آن نسبت به وضعیت اولیه چگونه تغییرمیکند؟

با محاسبه نشان دهیدکه دراین انتقال اندازه تغییرانرژی پتانسیل جاذبهای دوبرابر اندازهتغییر انرژی جنبشی آن است. چه تغییری درانرژیکل آن حاصل میشود؟

۱۱) ــ نشان دهیدکه اگراتومبیلی تحت اثر نیروی ثابت $\vec{F}$ که صرف غلبه بر اصطکاك میشود با تندی ثابت $\vec{v}$ در حرکت باشد توان لازم برای ثابت نگاهداشتن این تندی برابر $P = Fv$ است.

۱۲) – درصنعت توان موتورها را برحسب واحدی به نام اسب بخار می‌سنجند. اسب بخار تقریباً معادل توان دستگاهی است‌که جرم ۷۵ کیلوگرم را درمدت یك ثانیه به‌اندازه یك متر بالا ببرد. این توان چند وات و چند کیلووات است؟

۱۳) – بازده یك مولد (یاهروسیله دیگری‌که انرژی‌را ازیك صورت‌به‌صورت دیگرتبدیل می‌کند) بنا به‌تعریف عبارت است از مقدار درصد انرژی کل مصرفی‌که به صورت انرژی قابل استفاده پس می‌دهد. بازده موتورهای درون‌سوز درحدود ده درصد است یعنی مثلا ٪۱۰ از انرژی شیمیائی نهفته درسوخت یك اتومبیل‌صرف حرکت آن می‌گردد. پس ٪۹۰ بقیه چه می‌شود؟

۱۴) – مولد A نسبت به مولد B دارای توان بیشتر ولی بازده کمتر است. این بدان معنی است‌که مولد A نسبت به مولد B با مقدار سوخت مساوی

۱– کار بیشتر ولی کندتر انجام می‌دهد.

۲– کار کمتر ولی تندتر انجام می‌دهد.

۳– کار بیشتر وتندتر انجام می‌دهد.

۴– کار کمتر و کندتر انجام می‌دهد.

۱۵) – هریك از جمله‌های رابطهٔ $\Delta E = W + Q$ ممکن است منفی باشد. دردستگاههای زیر کدام جمله‌های رابطه بالا منفی است؟

۱– شخصی‌که ازیك طناب پائین می‌رود.

۲– یك باتری اتومبیل هنگام به‌کار انداختن موتور.

۳– یك لامپ برق بلافاصله پس از روشن شدن.

۴– یك لامپ برق پس ازآن‌که یکساعت روشن است.

۵– یك یخچال الکتریکی هنگامی‌که کار می‌کند.

۶– یك ترقه وقتی‌که منفجر می‌شود.

۱۶) – در چه نوع برخوردی انرژی جنبشی محفوظ می‌ماند؟ در چه صورت قانون بقاء اندازه حرکت معتبر است؟

۱۷) – توضیح دهید کـه قانون بقای‌اندازهٔ حرکت در باره یك توپ تنیس که به دیوار می‌خورد وبرمی‌گردد چگونه به‌کار می‌رود؟

۱۸) – نشان دهیدکـه وقتی دوجسم بـه هم برخـورد می‌کنند تغییر سرعت آنهـا نسبت عکس با جرمشان دارد یعنی:

$$\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

۱۹) ـ دوگلوله که جرم یکی سه برابر جرم دیگری است و هردو با یك سرعت به‌طرف هم حرکت می‌کنند به‌طور روبروبه‌هم برخورد می‌نمایند. پس ازبرخورد، گلوله بزرگترمتوقف می‌شود وگلوله کوچکتر با سرعتی دوبرابر سرعت اولیه خود برمی‌گردد . نشان دهیدکه هم اندازه حرکت وهم انرژی جنبشی آنها محفوظ می‌ماند.

۲۰) ـ روی دو اتومبیل کوچك (از نـوع اسباب‌بازی) دو آهن‌ربـای قـوی طوری نصب می‌کنیم کـه وقتی دو اتومبیل بـه هم نزدیك می‌شوند قطبهای همنام آهن‌رباهـا مقابل هم قرار می‌گیرند. این دواتومبیل‌را روی‌سطح افقی‌که اصطکاك‌آن ناچیز است به‌طرف هم‌حرکت‌می‌دهیم وقتی‌کـه خیلی به هم نزدیك شدند بدون این‌که بـرخورد واقعی بین آنها صورت بگیرد از هم به‌سرعت دور می‌شوند:

الفـ آیا این کیفیت را می‌توان برخورد نامید؟

بـ آیا قانون بقای اندازه حرکت را می‌توان به‌کار برد؟

این مسئله ها را حل کنید

۱) ـ یك قایق‌بادی به‌جرم $۲۰۰/۰\,kg$ که برای حرکت روی یخ ساخته شده است برسطح یخ بسته دریاچه‌ای حرکت می‌کند وباد دریك مسیر ۹۰۰/۰ متری نیروی ثابت ۱۰۰/۰ نیوتن برقایق وارد می‌سازد. اگر قایق ازحال سکون شروع به‌حرکت کند واصطکاك سطح ناچیزفرض شود سرعت حرکت قایق را در پایان مسیر ۹۰۰/۰ با دو روش زیر حساب کنید :

الفـ با استفاده از قانون دوم نیوتن.

بـ با استفاده از قضیهٔ انرژی جنبشی.

جواب : $۳۰\frac{m}{s}$

۲) ـ اتومبیلی به جرم یك تن که درجاده‌ای افقی بـا سرعت ثابت $۲۰/۰\frac{m}{s}$ در حرکت است در اثر نیروی ثابت تـرمز سرعتش به $۱۰/۰\frac{m}{s}$ می‌رسد. کار نیروی ترمز را درمدت این تغییر سرعت برحسب کیلو ژول حساب‌کنید.

جواب : ۱۵۰ kJ

۳) ـ گلوله‌تفنگی به‌جرم ۲/۰ گرم باسرعت ۳۰۰/۰ متر برثانیه به تنه درختی برخورد می‌کند و ۵/۰ سانتیمتر در امتداد خط راست درآن فرو رفته ومتوقف می‌شود.

الف ـ تغییر انرژی جنبشی گلوله چه اندازه است؟

ب ـ کاری که درخت روی گلوله انجام می‌دهد چند ژول است و چه اندازه گرما برحسب ژول و کالری تولید می‌شود؟

پ ـ نیروی متوسط وارد بر گلوله درمدت حرکت آن درتنه درخت چند نیوتن است؟

جواب : الف ـ ۹۰ J ب ـ ۹۰ J و ۹۰ J و ۲۱/۶cal پ ـ ۱۸۰۰ N

۴) ـ تعداد ۵ آجر یکسان که جرم هریك ۲/۰ کیلوگرم و ضخامت هریك ۰/۰۶ متر است ازطرف رویه بزرگترشان روی‌یك سطح افقی قرارگرفته‌اند. برای این‌که آجرهارا ازهمان رویهٔ بزرگترشان روی هم بچینیم چند ژول‌کار باید انجام دهیم؟

جواب : ۱۱/۷۶ J

۵) ـ یك هواپیمای جت که جرم آن با مسافر وبار روی هم $۱/۲۰ \times ۱۰^{۵}kg$ است از فرودگاه تهران‌که تقریباً درارتفاع ۱۲۰۰ متری سطح‌دریاست به‌مقصدآبادان‌باسرعت $۶۰/۰\frac{m}{s}$ باند فرودگاه را ترك می‌کند و در ارتفاع ۸/۰ کیلومتری سطح تراز دریا باسرعت $۷۲۰\frac{km}{h}$ پروازمی‌نماید. درمسیر خود به‌هوای طوفانی برخورد می‌کند وبرای رهائی از توفان تاارتفاع ۱۲/۰ کیلومتری سطح تراز دریا اوج می‌گیرد و دراین ارتفاع با سرعت $۸۱۰\frac{km}{h}$ پرواز می‌کند. نزدیك فرودگاه مقصد تا ارتفاع ۳/۰ کیلومتری سطح تراز دریا پائین می‌آید وسرعتش به $۳۶۰\frac{km}{h}$ می‌رسد ودرآخردرفرودگاه آبادان تقریباً هم‌ترازدریا به‌زمین می‌نشیند ومتوقف می‌شود انرژی مکانیکی کل هواپیما را درهریك ازمراحل نامبرده نسبت به‌سطح تراز دریا حساب کنید. انرژی مکانیکی را درحال سکون و سطح تراز دریا صفر بگیرید و g را ثابت فرض‌کنید.

جواب :

$۱/۶۴ \times ۱۰^{۹}J$ — $۱۱/۸ \times ۱۰^{۹}J$ — $۱۷/۱۵ \times ۱۰^{۹}J$ — $۴/۱۳ \times ۱۰^{۹}J$ — صفر

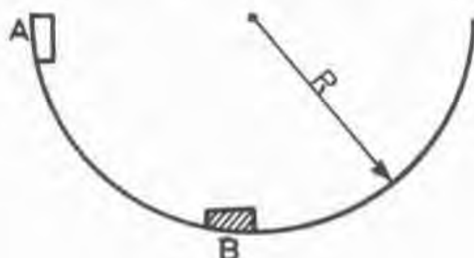
۶) ـ وزنه‌ای به‌جرم ۴/۵ کیلوگرم به‌وسیله یك رشته سیم باریك و سبك به‌طول ۵/۰ متر به‌سقف آزمایشگاه آویزان و درحکم یك پاندول ساده است. وزنه را به یك طرف می‌کشیم تا راستای سیم باامتداد قائم زاویه ۶۰° بسازد.

الف ـ انرژی پتانسیل ذخیره شده در وزنه را حساب‌کنید.

ب ـ هرگاه وزنه را رها کنیم و اثر مقاومت هوا برآن ناچیزباشد با چه سرعتی از وضع تعادل اولیه خود می‌گذرد و بیشترین مقدار انرژی جنبشی آن چه اندازه است .

جواب : الف) ۱۱۰/۲۵ J ب) $۷\frac{m}{s}$ و ۱۱۰/۲۵ J

۷) ـ وزنه‌ای به جرم m درون نیم‌کره‌ای به‌شعاع R ازنقطه A به‌نقطه B می‌لغزد و مسیر ربع دایره عظیمه AB را می‌پیماید (شکل ۸-۱۷) . کاری که نیروی وزن این وزنه در



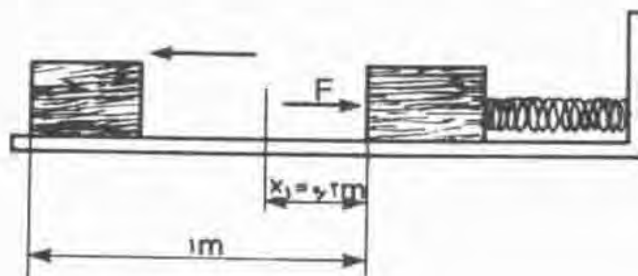
شکل ۸-۱۷

تغییر مکان AB انجام می‌دهد برابر است با

۱- صفر   ۲- mgR ۳- $mg.\frac{\pi R}{۲}$ ۴- $mg.\pi R$

درجواب صحیح بحث کنید .

۸) ـ به‌وسیله قطعه چوبی به‌جرم یک‌کیلوگرم‌که برسطح افقی میزی متکی است یك فنر افقی راکه جرم آن ناچیزفرض می‌شود متراکم می‌کنیم به‌طوری‌که طول‌آن نسبت به‌وضع آزاد اولیه به‌اندازهٔ ۰/۲۰ مترکوتاه شود (شکل ۸-۱۸) . هرگاه فنر را رهاکنیم وزنه روی سطح



شکل ۸-۱۸

میز به اندازه مسافت ۱ متر جا به جا می‌شود و می‌ایستد . اگر ثابت فنر $k = ۱۰۰\frac{N}{m}$ باشد ضریب اصطکاك بین سطح میز و وزنه را حساب‌کنید .

جواب :   تقریباً ۰/۲

۹) ـ کامیونی به جرم ۵×۱۰^{۳} کیلوگرم دریك جاده شیب دار که شیب آن دو درصد است ($sin\alpha = ۰/۰۲$) با تندی ثابت $۱۰ \frac{m}{s}$ بالا می‌رود و نیروی مقاوم در مقابل حرکت

کامیون برابر $\frac{۴}{۱۰۰}$ وزن آن است.

الف ـ توان کامیون دراین حرکت چه اندازه است ؟

ب ـ کامیون با همین توان ، حداکثر با چه تندی دراین جاده می‌تواند پائین آید ؟

فرض کنید نیروی مقاوم درموقع پائین آمدن کامیون تغییر نمی‌کند .

جواب : الف ـ ۲۹/۴kw ب ـ $۳۰\frac{m}{s}$

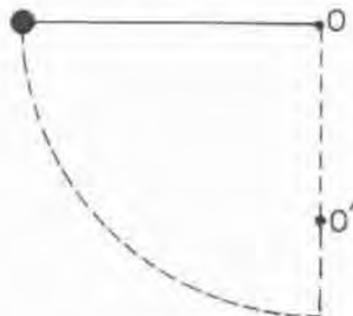
۱۰) ـ توان مصرفی یك موتور الکتریکی ۲۰۰ وات وبازده آن ۶۰ درصد است، مقدار گرمائی که درهرثانیه در این موتور تولید می‌شود چه اندازه است ؟

جواب : ۸۰ ژول معادل تقریباً ۱۹/۲ کالری

۱۱) ـ ازآبشاری به‌ارتفاع ۴۲ متر درهردقیقه به‌طور متوسط ۱۶۰ مترمکعب آب فرو می‌ریزد. توان متوسط این آبشار را برحسب کیلووات حساب کنید .

جواب : تقریباً ۱۱۰۰ kw

۱۲) ـ پاندول ساده‌ای به طول l=۱m را که به نقطه O آویزان است مطابق شکل (۸-۱۹) به وضع افقی برده و رها می‌کنیم . اگر نخ پاندول به هنگام عبور از راستای قائم در



شکل ۸-۱۹

نقطه ′O به میخ افقی برخوردکند کمترین فاصله ′OO چه اندازه باید باشد تا گلوله بتواند به دور میخ ′O مسیر دایره‌ای کاملی را بپیماید. همه اصطکاکها را ناچیز بگیرید .

جواب : حداقل ۰/۶۰ متر

۱۳) ـ ماهواره‌ای به جرم m روی مدار دایره‌ای شکلی به شعاع ۲R به‌گرد زمین می‌گردد (R شعاع کره زمین است) انرژی جنبشی این ماهواره را حساب کنید .

۱۴) ـ یك گوی چوگان بازی به‌جرم ۰/۲۰۰ کیلوگرم که باسرعت $۵/۰\frac{m}{s}$ در راستای افقی‌حرکت می‌کند دراثرضربه چوگان باسرعت $۸/۰\frac{m}{s}$ در خلاف جهت حرکت اولیه خود

برمی‌گردد. اگر ضربه چوگان بر گوی ۰٫۰۱ ثانیه طول بکشد نیروی متوسط وارد از چوگان بر گوی چند نیوتن است؟

جواب : ۲۶۰ N

۱۵) - یك نوترون با سرعت $۱۰^۷ \frac{m}{s}$ به یك هسته هلیوم ساکن که جرمش ۴ برابر جرم نوترون است برخورد کامل (روبرو) می‌کند و با سرعت ۶×۱۰^۶ متر برثانیه در خلاف جهت اولیه خود برمی‌گردد. اگر برخورد کاملا الاستیك باشد سرعت هسته هلیوم پس‌ازبرخورد چه اندازه است ؟

جواب : $۴ \times ۱۰^۶ \frac{m}{s}$

۱۶) - جسمی به‌جرم m که با سرعت v درحرکت است به جسم دیگری به‌همان جرم که ساکن است برخوردکرده و به‌آن متصل می‌شود (برخورد غیرالاستیك کامل) . اگر هیچ نیروی خارجی برمجموعه دوجسم وارد نشود انرژی جنبشی مجموعه پس از برخورد برابر است با :

۱- $\frac{۱}{۴}mv^۲$ ۲- $\frac{۱}{۸}mv^۲$ ۳- $\frac{۱}{۲}mv^۲$ ۴- $mv^۲$

جواب درست را با محاسبه پیدا کنید.

۱۷) - یك مرد به جرم ۶۰٫۰ کیلوگرم ویك ارابه به جرم ۳۰٫۰ کیلوگرم روی یك سطح افقی دریك راستا به‌طرف هم درحرکتند. سرعت مرد ۱/۵ متربرثانیه وسرعت ارابه ۰/۵ متر برثانیه است. وقتی‌که مرد به ارابه می‌رسد با سرعتی‌که دارد روی آن سوار می‌شود. اگر راستای حرکت ارابه تغییر نکند سرعت مجموعه مرد و ارابه

۱- $\frac{۵}{۶}$ متر برثانیه و در جهت حرکت ارابه است.

۲- $\frac{۵}{۶}$ متر برثانیه و در جهت حرکت مرد است.

۳- $\frac{۷}{۶}$ متر برثانیه و در جهت حرکت ارابه است.

۴- $\frac{۷}{۶}$ متر برثانیه و در جهت حرکت مرد است.

۱۸) - در مقابل دهانه تفنگی‌که لوله آن در راستای قائم نگاه داشته شده است قطعه چوبی به‌جرم ۴/۵۰ کیلوگرم قرار دارد. تفنگ آتش می‌شود وگلوله آن‌که جرمش ۰٫۲۵ گرم است پس ازخروج از دهانه لوله بلافاصله وارد قطعه چوب می گردد و مجموعه چوب وگلوله تاارتفاع ۲/۸۵ متر درامتداد قائم به‌بالا پرتاب می‌شود تندی گلوله را به‌هنگام خروج ازلوله تفنگ حساب کنید.

جواب : $۱۳۵۳\frac{m}{s}$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۸

۸-۱) - بلی، وقتی که جهت نیروی $\vec{F}$ رو به پائین باشد وجسم را برسطح تکیه گاه خود بفشارد.

۸-۲) - کار منفی معرف کار نیروی مقاوم است و نشان می‌دهد که یك همنه نیرو درخلاف جهت حرکت جسم وجود دارد و در مقابل حرکت آن مقاومت می کند مـانند نیروی اصطکاك که با جهت حرکت جسم زاویه ۱۸۰° می‌سازد.

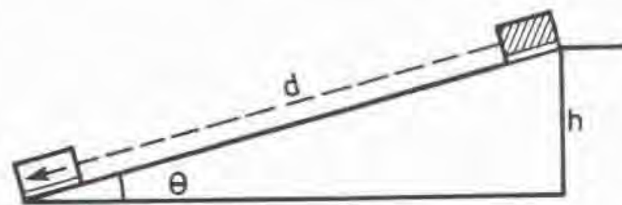
۸-۳) - به صورت گرما.

۸-۴) - انرژی پتانسیل الکتریکی.

۸-۵) - این کار صرف غلبه براصطکاك می‌شود وبه گرما تبدیل می گردد.

۸-۶) - قسمتی ازکارانجام شده صرف غلبه براصطکاك می‌شود وبه گرما تبدیل می گردد و قسمت دیگر بصورت انرژی پتانسیل درجسم ذخیره می‌شود (شکل ۸-۲۰):

$$W = fd + mgh$$



شکل ۸-۲۰

۸-۷) - بلی، چه فنرکشیده شود وچه متراکم گردد انرژی پتانسیلی کـه در آن ذخیره می‌شود ازرابطهٔ $E_p = \frac{1}{2}kx^2$ حساب می‌شود.

۸-۸) - دیمانسیون انرژی جنبشی همان دیمانسیون کار است، زیرا

$$\frac{1}{2}M(LT^{-1})^2 = \frac{1}{2}ML^2T^{-2}$$

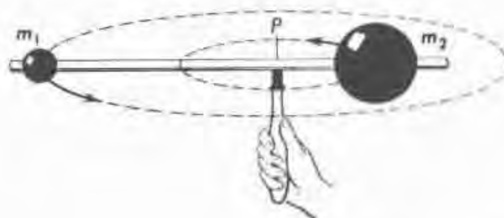
۸-۹) - گلوله پس از برخورد بەسطح صیقلی و سخت دوباره بەطرف بالا برمی‌گردد و اگراتلاف انرژی درکار نباشد تمام انرژی جنبشی آن دوباره بەانرژی پتانسیل تبدیل می‌شود وبەهمان ارتفاع سقوط اولیه خود می‌رسد. درعمل بەعلت وجود اصطکاك وتغییر شکل جزئی که درسطح برخورد بەوجود می‌آید مقداری ازانرژی تلف می‌شود وگلوله نمی‌تواند بەارتفاع اولیهٔ خود برسد.

۹

دوران

دربخشهای پیش ، برای بررسی سینماتیك و دینامیك اجسام ، همواره‌آنها را درحکم ذره درنظر گرفته‌ایم وموردی پیش نیامده‌است که شکل و ابعاد جسم را در بررسی حرکت آن منظور داریم. در بیشتر مسائل مربوط به حرکت، چنان‌که دیدیم کافی است که تمام جرم جسم را دریك نقطه متمرکز بگیریم وفقط حرکت انتقالی‌آن را بررسی‌کنیم ولی در پاره‌ای ازموارد لازم است‌که شکل و ابعاد جسم را درحرکت آن منظور داریم. مثلا موقعی‌که یك جسم صلب (یعنی جسمی‌که شکلش کاملا مشخص و تغییرناپذیر است) حرکت می‌کند علاوه برحرکت انتقالی دارای حرکت دورانی نیزهست. دراین‌بخش ما دوران (چرخش) یك جسم صلب به دور یك محورثابت رابررسی خواهیم کرد. این نوع حرکت، دوران بدون انتقال نامیده‌می‌شود ، مانند حرکت چرخ طیار یك ماشین، بسیاری ازحرکتها ترکیبی ازدو حرکت انتقالی و دورانی هستند مانند حرکت زمین و ماه و سیاره‌ها درفضا که ترکیبی از دو حرکت وضعی و انتقالی است، یاحرکت یك گلوله برروی یك‌سطح‌که ضمن حرکت انتقالی دارای حرکت‌دورانی نیزهست. بررسی این حرکات پیچیده‌تر است وما بدون این‌که وارد بحث درآنها بشویم به بیان یك یا دومثال اکتفا می‌کنیم.

دوران جسم صلب به دور محوری‌که ازگرانیگاه آن می‌گذرد - شکل ۹-۱ دوجرم مختلف M_1 و M_2 را نشان می‌دهد‌که به دو سر میله‌ای نصب شده‌اند و دستگاه حول محور نوك تیزی که روی پایه قائمی قرار داده شده است (و این محور از گرانیگاه دستگاه‌می‌گذرد) درسطح افقی می‌چرخد و



شکل ۹-۱- حرکت‌دورانی حول‌محوری‌که‌ازمرکز ثقل می‌گذرد

حرکت آن منظم است. بدیهی است اگر دستگاه را حول محوری که از گرانیگاه آن نمی‌گذرد (مثلا حول محوری که از وسط فاصله دو جسم می‌گذرد) بچرخانیم نظم حرکت بهم می‌خورد و به اصطلاح لنگی پیدا می‌کند.

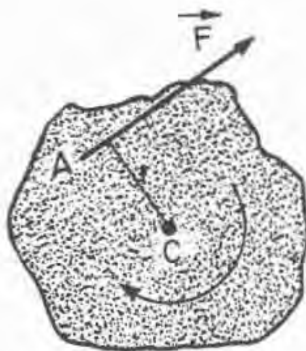
شکل ۹-۲- فرفره‌ای را نشان می‌دهد که آن هم به دور محوری که از مرکز ثقلش می‌گذرد می‌چرخد و تاوقتی که حول این محور دوران می‌کند دارای تعادل است.



شکل ۹-۲- تاوقتی‌که فرفره حول محور مار برمرکز ثقلش دوران می‌کند دارای تعادل است.

گشتاور نیرو عامل مؤثر در دوران - گشتاور نیرو چنانکه می‌دانیم عاملی است که سبب گشتن یك جسم به‌دورمحور می‌شود واندازه آن برابراست با حاصل ضرب اندازه نیرو در فاصله بردار نیرو از محور دوران. مثلا درشکل (۹-۳) اندازه گشتاور نیروی ناترازمند $\vec{F}$ که در نقطه‌ای مانند A برجسم اثر می‌کند نسبت به نقطه C (واقع برمحور دوران) برابر است با:

$$L = F \times r \qquad (۱-۹)$$



شکل ۹-۳- عاملی‌که سبب دوران یك جسم صلب به‌دور یك محور می‌شود گشتاور نیرو است.

r فاصله نقطه C از نیروی $\vec{F}$ است یعنی طول خط عمودی است که ازنقطه C بر بردار F رسم می‌شود.

واحد گشتاور نیرو، نیوتن متر (N.m) است که نباید با واحدکار و انرژی اشتباه شود، زیرا در محاسبه کار نیرو وفاصله دریك راستا منظور می‌شوند ولی درگشتاور نیرو، این دو برهم عمودند. علاوه براین کار یك کمیت اسکالر است ولی گشتاور نیرو طبیعت برداری دارد و می‌توان آن را با یك بردار در راستای محور دوران نمایش داد.

پرسش ۹-۱- دیمانسیون گشتاورنیروچیست؟

بنا به قرارداد، اگرجهت چرخیدن جسم به دور محور درجهت مثبت (یعنی خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت) باشدگشتاور نیروی وارد برآن را باعلامت مثبت درنظرمی‌گیرند واگرچرخش جسم درجهت عقربه‌های ساعت صورت گیردگشتاور نیرو را باعلامت منفیْ منظور می‌دارند.

هرگاه یك جسم صلب که می‌تواند حول یك محورثابت بچرخد،تحت‌اثریك گشتاورنیروی نامتوازن **قرارگیردشروع به دوران می‌کند وسرعت زاویه‌ای آن‌مرتباً افزایش می‌یابدوهنگامی که سرعت‌زاویه‌ای** آن به‌حد معین می‌رسد اثر گشتاور نیروقطع می‌شود.

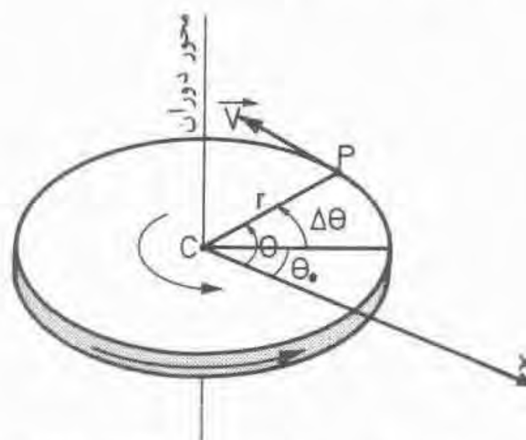
سرعت زاویه‌ای ـ سرعت زاویه‌ای که در بخش ۷ برای حرکت بر مسیر دایره‌ای تعریف شد در مورد دوران نیز به کار می‌رود . مثلا اگر متحرک زاویه $\Delta\theta = \theta - \theta_\circ$ را (شکل ۹-۴) درزمان $\Delta t = t - t_\circ$ بپیماید سرعت زاویه‌ای متوسط آن برابر است با :

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \qquad (۲-۹)$$

سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای ، حد سرعت متوسط است وقتی که Δt به‌سمت صفر میل کند یعنی :

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \qquad (۳-۹)$$

سرعت‌زاویه‌ای چنان‌که می‌دانیم برحسب واحد رادیان برثانیه (یا برحسب دور در دقیقه و ثانیه) بیان می‌شود چون به‌علت صلب بودن جسم، تمام نقاط‌آن باهم به‌دورمحور می‌چرخند سرعت زاویه‌ای همه نقاط جسم یکی است .



شکل ۹-۴ـ جسمی که باسرعت زاویه‌ای ω به دور یك محور می‌چرخد

شتاب زاویه‌ای ـ همان‌طورکه شتاب درحرکت برخط راست، **نشان‌دهندهٔ میزان تغییرسرعت درواحدزمان** است، شتاب زاویه‌ای هم در حرکت دورانی معرف **میزان تغییرسرعت زاویه‌ای درواحدزمان می‌باشد. اگر $\omega_\circ$ و ω به‌ترتیب سرعت‌های زاویه‌ای درلحظه‌های** $t_\circ$ و t باشند شتاب زاویه‌ای متوسط در زمان $\Delta t = t - t_\circ$ ، که آن را به $\bar{\alpha}$ نمایش می‌دهیم برابر است با :

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega - \omega_\circ}{t - t_\circ} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \qquad (۴-۹)$$

شتاب زاویه‌ای لحظه‌ای حد شتاب زاویه‌ای متوسط است وقتی که Δt به‌سمت صفرمیل کند یعنی :

$$\alpha = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \qquad (۵-۹)$$

شتاب زاویه برحسب واحد رادیان برمجذور ثانیه $\left(\frac{rad}{s^2}\right)$ بیان می‌شود وچون رادیان بدون دیمانسیون است دیمانسیون شتاب زاویه‌ای به صورت T^{-2} است .

اگر شتاب زاویه‌ای α ثابت بماند یعنی در **زمانهای مساوی تغییرات سرعت زاویه‌ای مساوی** باشد شتابهای زاویه‌ای متوسط ولحظه‌ای یکی‌هستند و می‌توانیم بنویسیم :

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_\circ}{t - t_\circ} \qquad (۶-۹)$$

و یا $\omega = \alpha(t - t_\circ) + \omega_\circ$

اگر مبدأ سنجش زمان را لحظهٔ $t_\circ = 0$ بگیریم خواهیم داشت :

$$\omega = \alpha t + \omega_0 \qquad (۹-۷)$$

ω_0 سرعت‌زاویه‌ای اولیه درمبدأ زمان‌است که ممکن است صفر باشد یعنی جسم از حـالت سکون شروع به‌چرخیدن‌کند.

مقادیر α و ω_0 و ω در رابطه‌های (۹-۶) و (۹-۷) نظیرمقادیر a و v_0 و v در رابطه‌های (۲-۹) و (۲-۱۰) است که دربخش ۲ درباره حرکت شتاب دار برخط راست آموخته‌ایم.

شتاب خطی- اگر سرعت زاویه‌ای ω ثابت نباشد **سرعت خطی یك نقطه ازجسم که‌ضمن‌حرکت‌آن‌مسیر** دایره‌ای شکلی به شعاع r را می‌پیماید (به شکل ۹-۴ مراجعه کنید) نیزتغییرمی‌کند در نتیجه، این نقطه علاوه‌برشتاب جانب مرکز دارای شتاب‌خطی (در راستای مماس بردایره مسیر) نیز هست. برای تعیین این شتاب خطی کافی است که در رابطه کلی $a = \frac{v - v_0}{t}$ به جـای v و v_0 معادل آنها را از رابطهٔ ۷-۶ (بخش ۷) قرار دهیم، در این صورت خواهیم داشت:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{r\omega - r\omega_0}{t} = \frac{r(\omega - \omega_0)}{t}$$

$$= r\alpha \qquad (۹-۸)$$

به‌طور کلی درحرکت‌چرخشی یك‌جسم صلب، مسافت طی شده و سرعت خطی و شتاب خطی یك نقطه ازمحیط جسم به‌ترتیب ازسه رابطه زیرحساب می‌شود:

$$(۹-۹)\quad \begin{cases} x = r\theta & \text{مسافت طی شده} \\ v = r\omega & \text{سرعت خطی} \\ a = r\alpha & \text{شتاب زاویه‌ای} \end{cases}$$

پرسش ۹-۲- درچه صورت شتاب خطی صفر است؟

پرسش ۹-۳- اندازه شتاب جانب مرکز در هر نقطه ازجسم درحرکت دورانی چیست؟ آیا مقدار آن همواره ثابت است؟

تعیین زاویه چرخش- زاویه کل چرخش یك جسم **دواردر زمان معین‌رامی‌توان‌به‌کمك‌سرعت زاویه‌ای** متوسط حساب کـرد. اگر شتاب زاویه‌ای α ثابت باشد سرعت زاویه‌ای متوسط با روشی شبیه به آن چه درحرکت برخط راست بیان شد ازرابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega + \omega_0}{۲} \qquad (۹-۱۰)$$

زاویه پیموده شده θ در زمان t برابر خواهد بود با:

$$\theta = \bar{\omega} t$$

یا:

$$\theta = \frac{\omega + \omega_0}{۲} \cdot t \qquad (۹-۱۱)$$

اگر در این رابطه به جای ω معادل آن‌را از رابطه (۹-۷) قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\theta = \frac{(\omega_0 + \alpha t) + \omega_0}{۲} \cdot t$$

یا:

$$\theta = \frac{1}{۲}\alpha t^{۲} + \omega_0 t \qquad (۹-۱۲)$$

که درست شبیه به معادله (۲-۱۲) درحرکت شتاب‌دار برخط راست است. (به‌بخش ۲ مراجعه شود) باحذف t از دو معادله (۹-۷) و (۹-۱۲)

خواهیم داشت:

$$\boxed{\omega^{2}-\omega_{0}^{2}=2\alpha\theta} \qquad (۱۳-۹)$$

پرسش ۹-۴- اگرجسم ازحال سکون شروع به چرخیدن کند روابط (۹-۷)و(۹-۱۲)و(۹-۱۳) به چه صورت درخواهند آمد.

مثال - تعداد دورهای موتور یك هواپیما در مدت ۳ ثانیه از ۳۰۰ دور در دقیقه به ۲۴۰۰ دور دردقیقه می‌رسد. اگرشتاب زاویه‌ای دوران موتور را ثابت فرض کنیم .

الف- سرعت‌زاویه‌ای‌متوسط موتوررا حساب کنید .

ب- زاویه کل چرخش در مدت ۳ ثانیه چند رادیان است؟

پ- شتاب زاویه‌ای حرکت موتورچیست؟

- ابتدا سرعتهای زاویه‌ای‌رابرحسب رادیان برثانیه حساب می‌کنیم.

$$\omega_{0}=\frac{300}{60}\times 2\pi=10\pi\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega=\frac{2400}{60}\times 2\pi=80\pi\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

الف- سرعت زاویه‌ای متوسط برابراست با:

$$\bar{\omega}=\frac{10\pi+80\pi}{2}=45\pi\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

ب - زاویه کل پیموده شده در زمان $t=3$ ثانیه برابر است با:

$$\theta=\bar{\omega}t=45\pi\times 3=135\pi\,\text{rad}$$
$$\simeq 424\ \text{rad}$$

پ- اندازه شتاب زاویه‌ای برابر است با:

$$\alpha=\frac{\omega^{2}-\omega_{0}^{2}}{2\theta}=\frac{(\omega+\omega_{0})(\omega-\omega_{0})}{2\theta}$$
$$=\frac{(80\pi+10\pi)(80\pi-10\pi)}{2\times 135\pi}$$
$$=\frac{90\pi\times 70\pi}{2\times 135\pi}=\frac{70\pi}{3}\approx 73\ \frac{\text{rad}}{\text{s}^{2}}$$

رابطهٔ بین گشتاور نیرو و شتاب زاویه‌ای (دینامیك دوران) - گفتیم وقتی بر یك جسم صلب، که می‌تواند به‌دور یك محورثابت بچرخد، گشتاور نیروی معینی اثرکند، جسم شتاب می‌گیرد و تندی زاویه‌ای آن مرتباً افزایش می‌یابد. در این جا می‌خواهیم رابطهٔ بین گشتاور نیرو و شتاب زاویه‌ای را پیدا کنیم.

شتاب زاویه‌ای نه‌تنهابستگی به‌شکل وابعاد جسم‌دارد بلکه به‌توزیع جرم جسم دراطراف محور دوران نیزبستگی دارد. برای پیداکردن رابطه بین این عوامل،نخست ازیك مثال ساده شروع‌می‌کنیم:

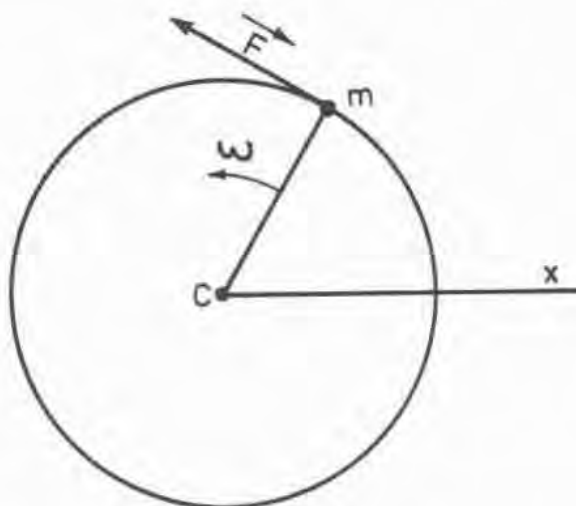
درنظر بگیریم که جرم کوچك m به سر نخی بسته شده ودر اثرگشتاور نیروی حاصل از نیروی $\vec{F}$ مطابق‌شکل (۹-۵) به‌دورنقطه ثابت C می‌چرخد. شتاب حرکت آن در روی دایره مسیر بنا به قانون دوم نیوتن ازرابطه

$$\vec{F}=m\vec{a}$$

حساب می‌شود. دوطرف ایـن رابطه را در r شعاع دایره مسیر، ضرب می‌کنیم:

$$\vec{F}\times r=m\vec{a}\times r$$

طرف‌چپ‌این‌رابطه‌یعنی $\vec{F}\times r$، گشتاورنیروی وارد برجرم m نسبت به نقطه C است که آن را به $\vec{L}$ نمایش داده‌ایم، اگر در طرف راست این معادله به جای شتاب a، معادل‌آن $r\alpha$ را ازرابطه(۹-۸)



شکل ۹-۶ـ شتاب زاویه‌ای دوران بستگی به گشتاور نیرو و گشتاور ماند دارد.

بگذاریم اندازهٔ گشتاور نیرو برابر خواهد بود با:

$$L = mr^2\alpha$$

m و r برای جسم مورد نظر، هردو ثابت هستند، بنابراین حاصل ضرب mr^2 نیز مقدار ثابتی است که آن را به I نمایش می‌دهیم و معادله بالا را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\boxed{L = I\alpha} \qquad (۱۴-۹)$$

$I = mr^2$ را «گشتاور ماند»[1] جرم m نسبت به مرکز دوران C می‌نامیم.

ازمقایسه رابطه $L = I\alpha$ با رابطه $F = ma$ نتیجه می‌گیریم که رفتار L در حرکت دورانی نظیر رفتار F در حرکت خطی و نقش α مشابه نقش a است.

رابطه (۹-۱۴) را می‌توان دربارهٔ هر جسم صلبی که به دور یك محور ثابت می‌چرخد به‌کار برد زیرا هر جسم صلب را می‌توان مرکب از تعداد زیادی اجزاء کوچك به‌جرمهای m_1 و m_2 و m_3 و... دانست که در فاصله‌های r_1 و r_2 و r_3 و... از محور دوران توزیع شده‌اند. بدیهی است گشتاور ماند کل جسم مجموع گشتاور ماندهای این اجزاء است یعنی:

$$I = m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + m_3r_3^2 + \ldots = \Sigma mr^2$$

محاسبه گشتاور ماند اجسامی که شکل هندسی متقارن دارند باروشهای خاص ریاضی صورت می‌گیرد و ازحدود برنامه این کتاب خارج است. در این جا فقط اندازهٔ گشتاور ماند چند جسم را بدون محاسبه می‌نویسیم:

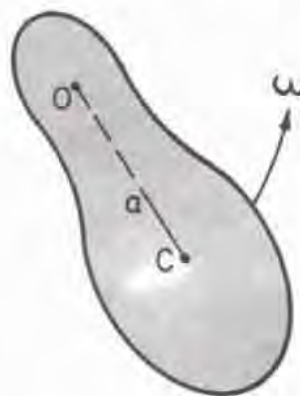
۱- اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی Moment of inertia و در زبان فرانسه ـ Moment d'inertie است و اصطلاح ممان اینرسی درکتابهای فارسی نیز به‌کار رفته است.

نوع جسم صلب	اندازهٔ گشتاور ماند I
میله همگن ویکنواخت به جرم m وبه طول l نسبت به محور عمود بروسط میله.	$\frac{1}{12} ml^2$
صفحه همگن مستطیل شکل به جرم m و به ابعاد a و b نسبت به‌محور عمود بروسط صفحه.	$\frac{1}{12} m(a^2 + b^2)$
حلقهٔ همگن نازك به جرم m و به شعاع R نسبت به محور عمود برسطح حلقه که از مرکز آن می گذرد .	mR^2
استوانه توپرهمگن‌به‌جرم m وبه‌شعاع قاعده R نسبت به محور استوانه.	$\frac{1}{2} mR^2$
استوانه‌توخالی همگن‌به‌جرم m وبه‌شعاعهای بیرونی و درونی R_1 و R_2 نسبت به‌محور استوانه .	$\frac{1}{2} m\left(R_1^2 + R_2^2\right)$
کره توپر همگن به جرم m و بـه شعاع R نسبت به قطر کره.	$\frac{2}{5} m R^2$
کره توخالی نازك همگن به‌جرم m وبه‌شعاع R نسبت به قطر کره.	$\frac{2}{3} m R^2$

در پاره‌ای از موارد ممکن است جسم به‌دور محوری که از مرکز ثقل آن نمی‌گذرد بچرخد. در این حالت گشتاور ماند جسم نسبت به محور دوران از رابطه زیر حساب می‌شود.

$$I = I_0 + ma^2 \qquad (۱۵-۹)$$

که در آن I_0 گشتاور ماند جسم نسبت به مرکز ثقل آن و m جرم جسم (که تمام آن بنا به فرض در مرکز ثقل متمرکز است) و a فاصله مرکز ثقل از محور دوران است (شکل ۹-۶).



شکل ۹-۶ - اگر جسم بدور محور O که از مرکز ثقل آن نمی‌گذرد بچرخد. $I = I_0 + ma^2$

بدیهی است چنانچه جسم شکل منظمی داشته باشد محاسبه گشتاور ماند آن نسبت به مرکز ثقل آسان است.

پرسش ۹-۵- باتوجه به دیمانسیون گشتاور ماند واحد آن را در دستگاه بین‌المللی واحدها بیان کنید.

انرژی جنبشی دوران - انرژی جنبشی یک جرم کوچک که مطابق شکل ۹-۵ با تندی $v = r\omega$ بر مسیر دایره‌ای به‌شعاع r به دور نقطه C می‌چرخد برابر است با:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m(r\omega)^2$$

انرژی جنبشی کل یک جسم صلب که باسرعت زاویه‌ای ω به‌دور یک محور ثابت می‌چرخد مجموع انرژی جنبشی ذراتی است که این جسم را تشکیل می‌دهند یعنی:

$$E_c = \frac{1}{2} m_1(r_1\omega)^2 + \frac{1}{2} m_2(r_2\omega)^2 + \ldots$$

$$= \Sigma \frac{1}{2} mr^2\omega^2$$

یا:

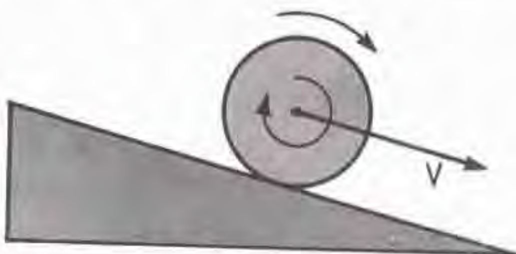
$$E_c = \frac{1}{2} |\Sigma mr^2| \omega^2$$

و یا:

$$\boxed{E_c = \frac{1}{2} I \omega^2} \qquad (۱۶-۹)$$

از مقایسه رابطه $E_c = \frac{1}{2} I\omega^2$ با رابطهٔ $E_c = \frac{1}{2} m v^2$ نتیجه می‌شود که I و ω در حرکت دورانی به‌ترتیب به‌جای m و v در حرکت بر خط راست به‌کار رفته‌اند.

وقتی که یک گلوله یا یک حلقه روی یک سطح می‌غلتد. (شکل ۹-۷) انرژی جنبشی آن مجموع دو انرژی دورانی و انتقالی است زیرا، هم به دور



شکل ۹-۷- انرژی جنبشی جسمی که روی یک سطح می‌غلتد مجموع انرژی جنبشی دورانی و انتقالی است

مرکز تقارن هندسی خود می‌چرخد وهم این مرکز تقارن هندسی در امتداد خط راست حرکت انتقالی دارد بنابراین:

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 + \frac{1}{2} mv^2 \qquad (17-9)$$

اندازه حرکت زاویه‌ای - اندازه حرکت زاویه‌ای جسمی که با سرعت زاویه‌ای ω به دور یك محور می‌چرخد بنا به تعریف برابر است با حاصل ضرب سرعت‌زاویه‌ای درگشتاورماند جسم نسبت به‌محور دوران یعنی :

$$P = I\omega \qquad (18-9)$$

در حالت خاصی که جرم کوچك m روی محیط یك دایره به شعاع r حرکت می‌کند $I = mr^2$ است و در نتیجه :

$$P = mr^2.\omega = mvr \qquad (18-9)$$

پرسش ۹-۶- با درنظرگرفتن وجوه تشابهی که حرکتهای دورانی وخطی دارند چه‌رابطه‌ای‌بین گشتاورنیرو وتغییراندازه حرکت زاویه‌ای می‌توانید بدست آورید ؟

پرسش ۹-۷- آیا قانون بقای اندازه حرکت درباره حرکت دورانی هم صادق است ؟

مقایسهٔ حرکت دورانی با حرکت خطی - ضمن بحث دربارهٔ سینماتیك ودینامیك حرکت دورانی در این بخش، دیدیم که‌شباهت‌زیادی بین‌روابط‌سینماتیکی ودینامیکی‌دردونوع‌حرکت‌خطی‌ودورانی وجود دارد به‌طوری‌که برای‌به‌دست‌آوردن روابط حرکت‌دورانی کافی است‌که رابطه‌های نظیرآنها را درحرکت‌خطی بنویسیم وبه جای x وv وa وm وF، کمیتهای مشابه آنهایعنی θ و ω و α و I و L را قراردهیم. درجدول زیر پاره‌ای از کمیتها و روابط بین آنها در این دو نوع حرکت برای مقایسه داده شده است.

در حرکت خطی		در حرکت دورانی	
مسافت طی شده	x	زاویه پیموده شده	θ
تندی خطی	$\vec{v} = \frac{dx}{dt}$	تندی زاویه‌ای	$\vec{\omega} = \frac{d\theta}{dt}$
شتاب خطی	$\vec{a} = \frac{dv}{dt}$	شتاب زاویه‌ای	$\vec{\alpha} = \frac{d\omega}{dt}$
جرم	m	گشتاورماند	$I = mr^2$
نیرو	$\vec{F} = m\vec{a}$	گشتاور نیرو	$\vec{L} = I \times \vec{\alpha}$
ضربه	$\vec{F}t$	ضربه‌زاویه‌ای	$\vec{L}t$
اندازه حرکت	$\vec{P} = m\vec{v}$	اندازه حرکت زاویه‌ای	$\vec{P} = I\vec{\omega}$
انرژی جنبشی	$E_c = \frac{1}{2} m v^2$	انرژی جنبشی	$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2$
کار	$W = F.x$	کار	$W = L.\theta$
توان	$P = F.v$	توان	$P = L\omega$

تعادل اجسام صلب ـ در بخش ۴ دیدیم که اگر برجسمی چند نیرو اثرکند و برآیند این نیروها صفر باشد جسم به حال تعادل است. این شرط را تحت عنوان شرط اول تعادل، به صورت کلی $\Sigma\vec{F}=0$ بیان کردیم. اگر نیروهای وارد برجسم دریك صفحه باشند هریك ازاین نیروها را چنان‌که دیدیم می‌توان به دو همنه در راستاهای دومحور x و y تجزیه کرد وشرط اول تعادل را به‌صورت زیر نوشت:

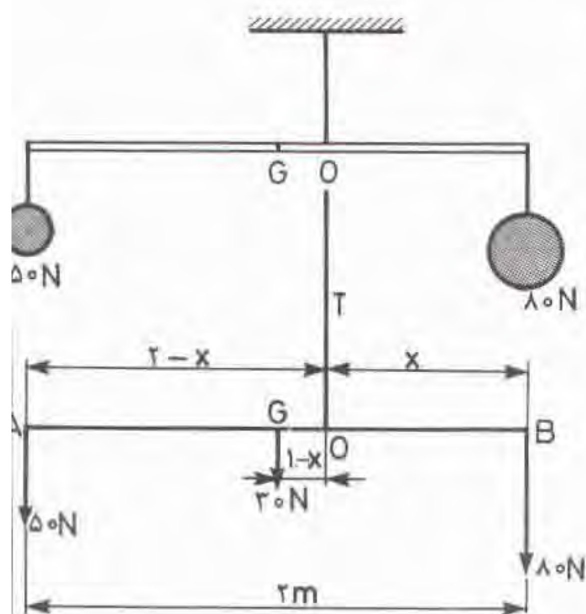
$$\Sigma F_y=0 \quad \text{و} \quad \Sigma F_x=0 \qquad (۱۹-۹)$$

شرط بالا برای بررسی تعادل جسم در حرکت انتقالی لازم وکافی است.

اگر بریك جسم صلب که می‌تواند به دور یك محور بچرخد چند گشتاور نیرو اثرکند وضع دوران جسم به دور محور بستگی به مجموع این گشتاورها دارد و برای این که جسم صلب تعادل داشته باشد باید مجموع جبری همهٔ گشتاورها نسبت به محور دوران صفر باشد یعنی:

$$\Sigma L=0 \qquad (۲۰-۹)$$

درحل مسائل مربوط به‌تعادل‌اجسام صلب، معمولا گشتاورهایی را که در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت (یعنی درجهت‌مثلثاتی) اثرمی‌کنند باعلامت مثبت وگشتاورهایی راکه درجهت حرکت عقربه‌های ساعت اثرمی‌نمایند باعلامت منفی درنظر می‌گیرند [1].



شکل (۹-۸)

مثال ـ به‌دوسرمیله یکنواختی به‌طول ۲/۰۰ متر و به وزن ۳۰/۰ نیوتن دو وزنه ۵۰/۰ نیوتنی و ۸۰/۰ نیوتنی مطابق شکل (۹-۸) آویزان است. میله را ازچه نقطه‌ای ازآن باید آویخت تا به‌طور افقی به حال تعادل بایستد؟ در این حالت نیروی کشش ریسمانی که میله به آن آویزان می‌شود چه اندازه است؟

ـ نخست نمودار ساده‌ای از نیروهای وارد برمیله را نمایش می‌دهیم. اگرنقطه O محل آویختن میله‌باشد شرط‌تعادل این‌است مجموع جبری‌گشتاور نیروها نسبت به محوری که از این نقطه (عمود برصفحه کتاب)می‌گذردصفر باشد. چون‌میله‌یکنواخت است گرانیگاه آن در وسطش قرار دارد. گشتاور نیروهای ۵۰/۰ نیوتنی و ۳۰/۰ نیوتنی نسبت به این

۱ـ درکتاب فیزیك سال اول نیز مطالبی در بارهٔ گشتاور و تعادل خوانده‌اید که می‌توانید به آنها نیز مراجعه کنید.

محور در جهت مثبت (جهت مثلثاتی) و گشتاور نیروی ۸۰ نیوتنی درجهت منفی (جهت عقربه‌های ساعت) اثرمی‌کند. اگر فاصله نیروی ۸۰ نیوتنی از نقطه O را به x نمایش دهیم داریم:

$$۵۰ \times (۲-x) + ۳۰ \times (۱-x) - ۸۰ \times x = ۰$$

یا

$$۱۶۰x = ۱۳۰$$

و

$$x = ۰/۸۱۲۵m = ۸۱/۲۵cm$$

برای محاسبه نیروی کشش ریسمان رابطه $\Sigma \vec{F}_y = ۰$ را به‌کار می‌بریم (نیروها همه در راستای قائم اثر می‌کنند) . اگر نیروی کشش ریسمان را به T نمایش دهیم داریم :

$$T - ۵۰ - ۳۰ - ۸۰ = ۰$$

یا

$$T = ۱۶۰N$$

به این پرسشها پاسخ دهید :

۱) ـ آیا تندی زاویه‌ای مانند تندی خطی کمیت برداری است و می‌توان آن را با یك بردار نمایش داد ؟

۲) ـ سرعت زاویه‌ای عقربه‌های ثانیه شمار و دقیقه شمار ساعت چه اندازه است ؟

۳) ـ درنظر بگیرید که چرخی با شتاب زاویه‌ای ثابت α به‌دورمحور ثابت خود می‌چرخد. یك نقطه از محیط این چرخ

۱ـ فقط شتاب جانب مرکز دارد

۲ـ فقط شتاب خطی دارد

۳ـ هم شتاب جانب مرکز و هم شتاب خطی دارد .

درجواب درست بحث کنید .

۴) ـ گشتاور ماند درحرکت دورانی نقش کدام کمیت درحرکت خطی را دارد ؟

۵) ـ در حرکت دورانی یك جسم صلب به دوریك محور ، چه رابطه‌ای بین گشتاور نیرو و گشتاور ماند برقرار است ؟

۶) ـ آیا برای تعیین گشتاور ماند یك جسم نسبت به محوری که ازگرانیگاه آن می‌گذرد می‌توان فرض کردکه تمام جرم جسم درگرانیگاه آن متمرکز شده است ؟

۷) ـ دوقرص همگن که جرم و ضخامت هردو یکی است، یکی از آلومینیوم ودیگری از فولاد ساخته شده است. گشتاور ماندکدام یك از این دوقرص نسبت به‌محوری که ازمرکز قرص عمود برسطح آن می‌گذرد بیشتر است ؟

۸) ـ در نظر بگیرید وسط صفحه‌گرد افقی کوچکی ایستاده‌اید و این صفحه به دور محور قائمی که ازمرکز آن می‌گذرد به آرامی می‌چرخد. درکدام یك از دوحالت زیر سرعت زاویه‌ای

دوران شما بیشتر خواهد بود؟

۱ـ وقتی که بازوهای خود را به طرفین درازکنید.

۲ـ وقتی که بازوها را به بدن خود بچسبانید.

۹) ـ درنظر بگیرید که یک غلتک (جسم جامد همگن به‌شکل استوانه) به‌جرم M و به‌شعاع R ازبالای سطح شیب داری که اصطکاک آن ناچیز است بدون لغزیدن می‌غلتد و به‌پائین سطح می‌رسد. اگرتغییرمکان مرکزثقل استوانه در راستای قائم h باشد بااستفاده ازقانون بقاء انرژی مکانیکی، نشان دهید که سرعت مرکز ثقل استوانه درپائین سطح برابر است با:

$$v = \sqrt{\frac{۴}{۳} gh}$$

۱۰) ـ اندازه حرکت زاویه‌ای را تعریف کنید. درچه صورت قانون بقای اندازه حرکت زاویه‌ای معتبر است؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱)ـ چرخی به‌قطر ۰/۶۰ متربدورمحورثابت‌خود ازحال سکون شروع به‌چرخیدن می‌کند و پس از ۲۰ ثانیه سرعت زاویه‌ای آن به $۱۰۰\frac{rad}{s}$ می‌رسد. اگرشتاب زاویه‌ای این‌حرکت ثابت باشد مقدار این شتاب و اندازه زاویه دوران چرخ را دراین مدت حساب‌کنید.

جواب: $۵\frac{rad}{s^۲}$ و $۱۰۰۰\ rad$

۲) ـ محور موتور اتومبیلی که در حال کار است در هردقیقه ۱۲۰ دور می‌زند. هرگاه با شتاب زاویه‌ای ثابت تعداد دورهای موتور در مدت ۴ ثانیه بـه ۳۶۰۰ دور در دقیقه برسد اندازه شتاب زاویه‌ای و زاویه کل پیموده شده دراین مدت را حساب‌کنید.

۳) ـ یك چرخ طیار که با سرعت زاویه‌ای ثابت ۳۱/۴ رادیان برثانیه درحـال دوران است دراثراعمال یك گشتاور نیرو درمدت ۲۰ ثانیه می‌ایستد، اگرگشتاورماند این چرخ نسبت به محور دوران آن $۶۳/۶kgm^۲$ باشد اندازه این گشتاور نیرو را حساب‌کنید.

جواب: تقریباً ۱۰۰N.m

۴) ـ یك حلقه به جرم ۲kg بدون لغزش برروی سطح افقی می‌غلتد و با سرعت خطی $۴\frac{m}{s}$ جلو می‌رود. انرژی جنبشی آن را حساب کنید.

اگر یك قرص همگن به همین و با همین سرعت روی سطح افقی بغلتد انرژی جنبشی آن چه اندازه خواهد بود ؟

جواب :　　　　۳۲ J　　و　　۲۴ J

۵) - قرقره‌ای به‌شکل یك قرص همگن به‌جرم ۰/۲۰۰ kg و به شعاع ۵/۰cm حول محور افقی ثابتی می‌تواند بچرخد. درشیار این قرقره نخ محکم وسبکی چندین دور پیچیده شده است که سرآن به قرقره متصل است و به سردیگر آن وزنه‌ای به‌جرم ۰/۵۰۰ کیلوگرم آویزان است . هرگاه وزنه رها شود در امتداد قائم پائین می‌آید و قرقره به دور محور خود می‌چرخد (مطابق شکل ۹-۹) . با استفاده ازقانون بقاء انرژی مکانیکی سرعت وزنه را پس از آن که



شکل ۹-۹

وزنه به اندازه یك متر سقوط کند حساب کنید. از اصطکاکها صرف نظر می‌شود. گشتاور ماند قرقره نسبت به محور دوران قرقره چه اندازه است ؟

جواب :　　　　تقریباً $۴/۰\frac{m}{s}$ و $۲/۵\times ۱۰^{-۴} kg.m^{۲}$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۹

۹-۱) - $ML^{۲}T^{-۲}$ که با دیمانسیون کاریکی است.

۹-۲) - شتاب خطی برابر $a=r\alpha$ است و در صورتی صفر است که شتاب زاویه‌ای α صفر باشد ، یعنی جسم با سرعت زاویه‌ای ثابت دوران کند.

۹-۳) - $r\omega^{۲}$ ، و درصورتی ثابت است که ω ثابت باشد .

۹-۴) - در این حالت $\omega_{۰}=۰$ است و داریم :

$$\begin{cases} \theta=\frac{۱}{۲}\alpha t^{۲} \\ \omega^{۲}=۲\alpha\theta \end{cases} \quad \text{و}$$

۹-۵) - $kg.m^2$

۹-۶) - اگر در رابطه $\vec{L}=I\vec{\alpha}$ به‌جای α معادل آن $\frac{\omega-\omega_0}{t}$ را بگذاریم خواهیم داشت:

$$\vec{L}=I\,\frac{\overrightarrow{\omega-\omega_0}}{t}$$

یا

$$\vec{L}t=I\vec{\omega}-I\vec{\omega}_0$$

ازمقایسه این رابطه با رابطه $\vec{F}t=m\vec{v}-m\vec{v}_0$ که معرف ضربه در حرکت خطی است می‌توان $\vec{L}t$ ضربه زاویه‌ای نامید.

۹-۷) - بلی، اگر در رابطه $\vec{L}t=I\vec{\omega}-I\vec{\omega}_0$ گشتاور نیروی L صفر باشد $I\vec{\omega}-I\vec{\omega}_0=0$ خواهد بود و درنتیجه $I\vec{\omega}=I\vec{\omega}_0$ است. یعنی اندازه حرکت زاویه‌ای ثابت می‌ماند.

۱۰

حرکات ارتعاشی و امواج

ارتعاش و موج در بسیاری از پدیده‌های جهان نقش مهم و اساسی دارند. موج چنان که می‌دانیم، یکی از وسیله‌های انتقال انرژی از جایی به‌جای دیگر است. انتقال انرژی به دوراه صورت می‌گیرد: یکی به وسیله انتقال ماده، به این معنی که ماده به‌هنگام انتقال، انرژی جنبشی و انرژی درونی خودرا نیزباخود می‌برد، دیگری به‌وسیله موج و در این‌گونه‌انتقال انرژی، ماده منتقل نمی‌شود.

موج انواع مختلف دارد ولی طرز انتقال انرژی توسط همه انواع‌آن یکسان است: موج دراثرحرکت ارتعاشی ماده تولیدمی‌شود وبه‌وسیله محیط مادی منتقل می‌گردد وانرژی حاصل ازمنبع‌ارتعاش را باخود انتقال می‌دهد. امواج الکترومانیتیك در خلاء نیز منتشر می‌شوند. علاوه براین ارتعاش وموج هردو درتوجیه ودرك بسیاری ازمباحث فیزیك، مانند صوت، پاره‌ای ازمظاهر نور، گرما، میکروویو و دنیای وراء اتمها وهسته‌ها نقش مهم واساسی دارند.

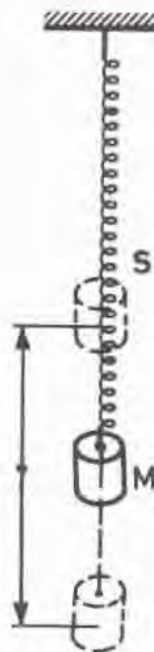
هر حرکتی چه ساده وچه مرکب، اگر در زمانهای مساوی و متوالی به نام « زمان تناوب » عیناً تکرار شود « حرکت تناوبی » نامیده می‌شود. حرکات تناوبی سریع را معمولا « حرکت ارتعاشی » می‌نامند. ما، درزندگی روزمرهٔ خود معمولا باحرکات تناوبی ساده‌ای سروکار داریم: حرکت آونگ یك ساعت دیواری یا حرکت چرخ رقاصك یك‌ساعت مچی ویا حرکت ارتعاشی‌یك‌شاخه دیاپازن مثالهای خوبی از این نوع حرکات هستند.

درکتاب فیزیك سال دوم، شما تا اندازه‌ای با حرکات موجی آشنا شده‌اید. دراین بخش حرکات تناوبی ساده را با شرح بیشتری دنبال خواهید کرد ودر بخشهای بعد پدیده‌های تناوبی صوت و نور و الکتریسیته را خواهید آموخت.

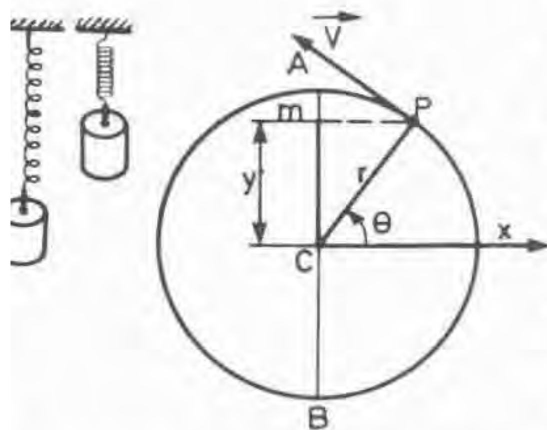
حرکت نوسانی ساده

حرکت نوسانی ساده به حرکتی گفته می‌شود که روی یک خط راست در دوطرف یك نقطه واقع در وسط مسیر حرکت باشتابی متناسب بافاصله متحرك ازاین نقطه صورت گیرد وجهت شتاب همواره متوجه این نقطه باشد. حرکت نوسانی ساده یکی ازنمونه‌های مهم حرکت تناوبی است که برروی خط راست انجام می‌گیرد، مانند حرکت نوسانی وزنه‌ای که به انتهای فنر سبکی آویخته شده و در راستای قائم با دامنه کم نوسان می‌کند (شکل ۱۰-۱) ویاحرکت پاندول ساده‌ای که با زاویه خیلی کوچك نوسان می‌نماید و یا حرکت ارتعاشی شاخه یك دیاپازن و مانند اینها.

شکل ۱۰-۱- وزنه‌ای که به انتهای یك فنر سبك آویخته شده است در راستای قائم با دامنه کم حرکت نوسانی ساده انجام می‌دهد.



برای بررسی این حرکت درنظر بگیریم که یك ذره P برروی دایره‌ای که شعاع آن برابر دامنه



شکل ۱۰-۲ - نمودار حرکت نوسانی ساده بر روی یك خ
راست.

حرکت نوسانی است (وآن را دایره مرجع می‌نامیم)
باسرعت ثابت v حرکت کند به طوری که مدت یك
دور حرکت آن روی این دایره برابر زمان تناوب
(یعنی زمان یك نوسان کامل) حرکت نوسانی باشد
حرکت تصویر این ذره (یعنی نقطه m) برروی یك
خط راست واقع درصفحه این دایره (مثلا قطر AB
نشان دهنده حرکت نوسانی ساده است. (شکل ۱۰-۲

این کیفیت را می‌توان با انداختن سایه یك
چوب پنبهٔ کوچك که روی لبهٔ یك قرص مقوائی ی
چوبی نصب شده است توسط یك لامپ روشن ب
روی دیوار عملا نمایش داد. وقتی که قرص به دو
محور خود می‌چرخد سایه چوب پنبه روی دیوا
حرکت نوسانی ساده در امتداد یك خط راست انجا
می‌دهد.

سرعت لحظه‌ای حرکت تصویر m روی قطر
A ، از A به B یا برعکس از B به A ثابت نیست
این سرعت درنقطه C بیشترین مقدارخودرا دارد
ر نقاط A و B صفر است، زیرا دراین نقاط تصویر
؛ دریك لحظه متوقف شده وجهت حرکت آن تغییر
ی کند.

فاصله تصویر m درهرلحظه ازمرکز C یعنی
= Cm را «بُعد حرکت» گویند اندازه y بین صفر
درمرکز C) و $\pm r$ (در نقاط A و B) تغییر
ی کند.

بیشترین مقدار y یعنی r را « دامنه حرکت »
ی نامند.

بعد متحرك m در حرکت نوسانی بر روی
ط راست AB بستگی به جای نقطه P روی دایره
جع دارد و با زاویه θ مشخص می‌شود (شکل
۱-۲). زاویه θ ، که مشخص‌کننده موقعیت نقطه
روی دایره مرجع ونقطه m روی قطراین دایره
ت « فاز حرکت » نامیده می‌شود.

زمان یك نوسان کامل را « زمان تناوب » یا
پریـد » حرکت می‌نامند و به T نمایش می‌دهند.
ر حرکت نوسانی از نقطه A شروع شود، یك
سان کامل وقتی انجام می‌گیردکه متحرك از A
B برود و دوباره به A برگردد. اگر حرکت‌از
شروع شود و متحرك به B برود و دوباره به
برگردد فقط نیم‌نوسان انجام داده‌است ونوسان
تی کامل می‌شود کـه این حرکت ازC به A ادامه
د ومتحرك دوباره به C برگردد.

تعداد نوسانهای کامل یا تعداد ارتعاشها در واحد زمان را « تواتر» یا « فرکانس » ویا«بسامد»[1] حرکت می‌نامند وآن را به f نمایش می‌دهند . بین پرید T وفرکانس f چنان‌که می‌دانیم رابطه‌های زیر برقرار است:

$$T=\frac{1}{f} \text{ و } f=\frac{1}{T} \qquad (1-10)$$

پرسش ۱۰-۱- وقتی‌که حرکت نوسانی‌ساده برپایه حرکت دایره‌ای تعریف می‌شود چه‌رابطه‌ای بین تواتر حرکت نوسانی و تعداد دورهای متحرك در ثانیه برمسیر دایره‌ای برقرار است؟

واحد تواتر چنان کـه می‌دانیم « هرتز » با علامت اختصاری Hz است ویك هرتز بنابه‌تعریف معادل یك نوسان کامل یا یك ارتعاش‌کامل درمدت یك ثانیه است.

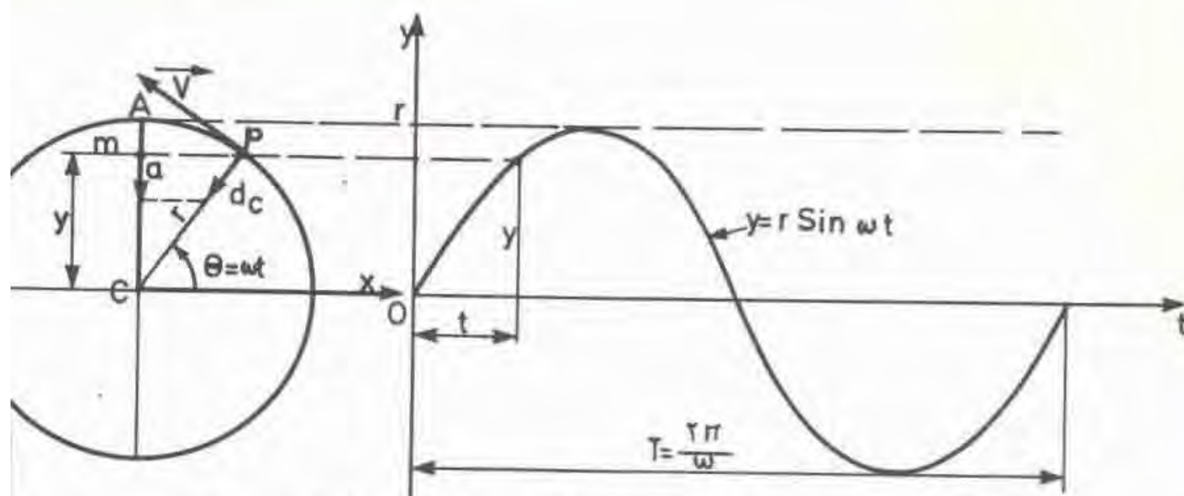
معادله‌های حـرکت و سرعت و شتاب در حرکت نوسانی ساده

الف- معادله حرکت- مبدأزمان(یعنی‌لحظهٔ $(t_0=0)$ را لحظه‌ای‌بگیریم‌که متحرك m درنقطه C است بعد حرکت نوسانی یعنی فاصله $Cm=y$ درلحظه t با توجه به شکل (۱۰-۳) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$y=r\sin\theta$$

چون‌نقطه P روی دایره‌مرجع باسرعت ثابت‌حرکت می‌کند شعاع حامل این نقطه (یعنی CP) باسرعت

۱- فرهنگستان زبان ایران بجای‌کلمه‌های تواتر و فرکانس، که اولی عربی و دومی لاتینی است، کلمه
رسی « بسامد » را انتخاب‌کرده است.



شکل ۱۰-۳- دایره مرجع برای نشان دادن حرکت نوسانی ساده در راستای محور yها

زاویه‌ای ثابت می‌چرخد بنابراین $\theta = \omega t$ است و داریم:

$y = r\sin\omega t$ معادله حرکت نوسانی ساده (۱۰-۲)

چون $\omega = \frac{۲\pi}{T} = ۲\pi f$ است پس :

$$y = r\sin\frac{۲\pi}{T}t = r\sin ۲\pi f t \qquad (۱۰-۳)$$

پرسش ۱۰-۲- اگر حرکت تصویر نقطه P را بر قطر افقی دایره مرجع در نظر بگیریم معادله حرکت‌آن به چه صورت خواهد بود؟

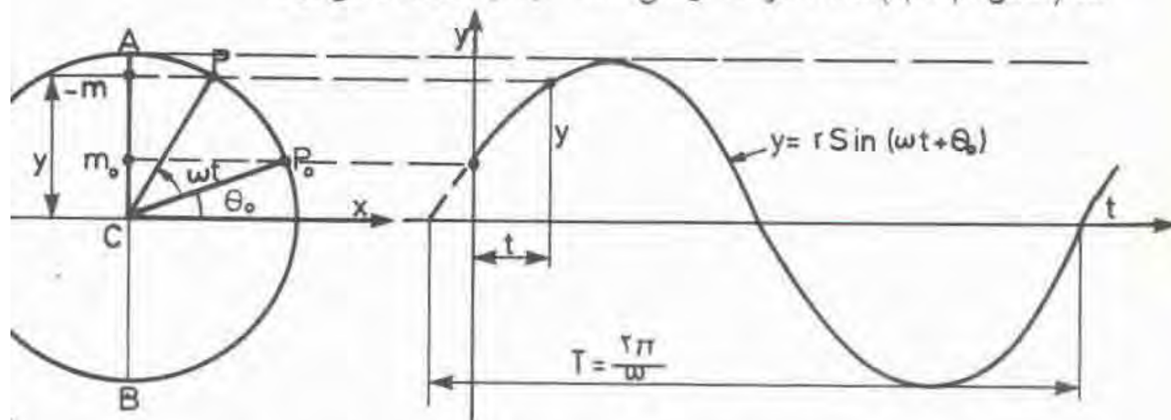
اگر درمبدأ زمان متحرک ازنقطه m_0 حرکت کند (شکل ۱۰-۴) معادله حرکت نوسانی ساده به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$\boxed{y = r\sin(\omega t + \theta_0)} \qquad (۱۰-۴)$$

در این صورت فازحرکت $\omega t + \theta_0$ است و θ_0 «فاز اولیه» نامیده می‌شود.

وقتی‌که نقطه P روی دایره مرجع حرکت می‌کند، زاویه ωt به طور یکنواخت افزایش می‌یابد و مبدأ سنجش‌آن همواره θ_0 است، ولی مبدأ سنجش فاز کل $\omega t + \theta_0$ محور x است.

پرسش ۱۰-۳- زاویه‌های ωt و θ_0 برحسب چه واحدی بیان می‌شوند؟



شکل ۱۰-۴- نمایش فاز اولیه درحرکت نوسانی ساده

درطرف راست شکلهای (۱۰-۳) و (۱۰-۴) دونمودار سینوسی نمایش داده شده است که تغییرات بعد y را برحسب زمان t دریك پریدنشان می‌دهند. در این دو نمودار زمان t روی محور افقی وبعد y روی محور عمود برآن نمایش داده‌شده است. نمونه این نمودارها را می‌توان عملا رسم کرد: بەوزنه M آویخته شده به انتهای فنر می‌توان یك قلم متصل کردکه نوك‌آن‌روی نوار کاغذی‌که بەطوریکنواخت حرکت می‌کند خط بکشد. وقتی‌که وزنه نوسان‌کند روی نوارکاغذ متحرك منحنی سینوسی رسم‌می‌شود (شکل ۱۰-۵) این منحنی نمایش تغییرات بعد y برحسب زمان است.

ب- معادله سرعت- میدانیم سرعت لحظه‌ای‌مشتق معادله‌حرکت‌است . بنابراین برای به دست آوردن معادلـه سرعت لحظه‌ای متحرك در حرکت نوسانی ساده ، کافی است مثلا از معادلهٔ (۱۰-۲) مشتق بگیریم.[1]

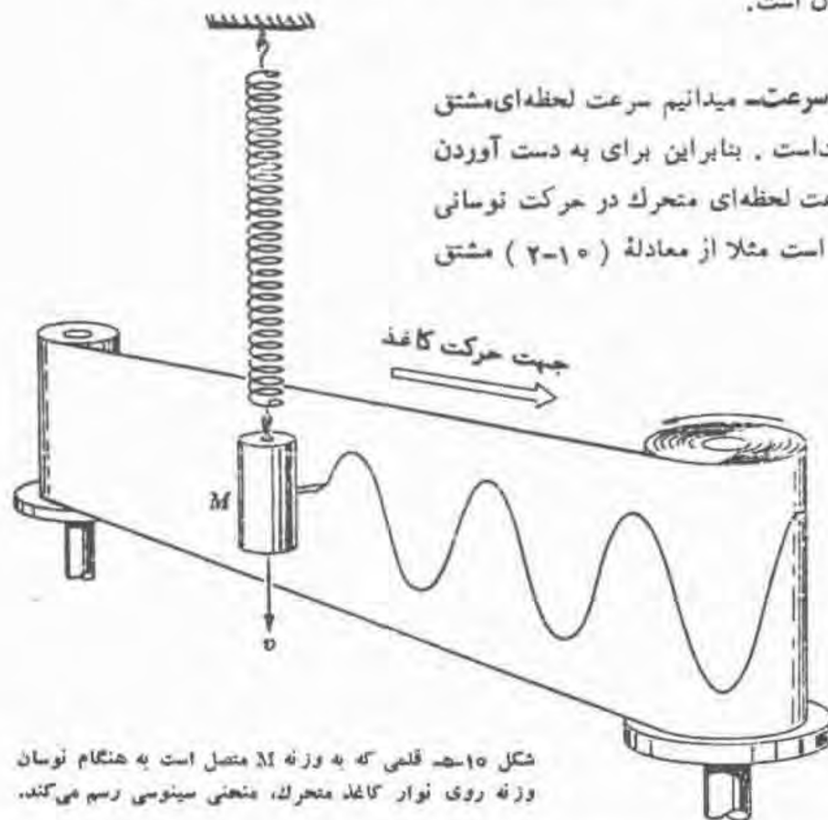
$$v=\frac{dy}{dt}=r\omega\cos\omega t \qquad (۱۰-۵)$$

بیشترین مقدار سرعت برابر است با :

$$v_{max}=r\omega \qquad (۱۰-۶)$$

وآن مربوط به لحظهٔ $t=0$ و یا $t=KT$ است (K یك عدد درست است) یعنی موقعی که متحرك ازنقطه C می‌گذرد.

پرسش ۱۰-۴- درچه لحظاتی از یك پریدT سرعت متحرك صفر می‌شود؟



شکل ۱۰-۵- قلمی که به وزنه M متصل است به هنگام نوسان وزنه روی نوار کاغذ متحرك، منحنی سینوسی رسم می‌کند.

۱- زیرا بطوری‌که در درس ریاضی خوانده‌اید مشتق $\sin\omega t$ برابـر $\omega\cos\omega t$ است.

پ ـ معادلهٔ شتاب ـ شتاب لحظه‌ای مشتق معادله سرعت است و داریم[1]

$$a = \frac{dv}{dt} = -r\omega^{2} \sin\omega t \qquad (۷-۱۰)$$

یا :

$$\boxed{a = -\omega^{2} y} \qquad (۸-۱۰)$$

تعبیر علامت منفی این است که جهت بردار شتاب a همواره متوجه مرکز C است، به‌عبارت دیگر جهت y و a مخالف یکدیگر است . بیشترین مقدار شتاب مربوط به‌حالتی است که $y = r$ باشد $\left(\omega t = \frac{\pi}{2}\right)$ یعنی :

$$\boxed{a_{max} = \omega^{2} r} \qquad (۹-۱۰)$$

دراین حالت متحرك دریکی از دوانتهای مسیر خود یعنی در نقطه A یا B است. درهمین نقاط است که سرعت متحرك صفر می‌شود و جهت حرکت تغییر می‌کند.

محاسبه زمان تناوب

اگر در رابطهٔ (۱۰-۸) به‌جای ω معادل آن $\frac{2\pi}{T}$ را بگذاریم زمان تناوب T حساب می‌شود :

$$a = -\frac{4\pi^{2}}{T^{2}} y$$

و :

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{-y}{a}}} \qquad (۱۰-۱۰)$$

این رابطه کلی است و در مورد هر حرکت ارتعاشی یانوسانی ساده به‌کار رود زیرا زمان تناوب برحسب بعد حرکت و شتاب مربوط به آن حساب می‌شود[2] .

اینك نوسان یك فنر وحرکت نوسانی پاندول ساده را به‌عنوان کاربرد این رابطه شرح می‌دهیم

۱ـ نوسان فنر ـ هرگاه جرم m را که به انتهای فنرسبك s آویخته شده‌است (شکل ۱۰-۱) به‌اندازه بعد کوچك y از وضع تعادل خود منحرف کنیم فنر نیروی برگرداننده $F = -Ky$ را برآن اعمال می‌کند که می‌خواهد آن را به وضع اولیه خود برگرداند. اگرنیروهای اصطکاك ناچیزباشند شتابی که جرم m در اثر این نیرو می‌گیرد از رابطه زیر حساب می‌شود :

$$ma = -Ky$$

یا

$$-\frac{y}{a} = \frac{m}{K}$$

اگر در رابطه ۱۰-۱۰ به‌جای $\frac{-y}{a}$ معادل‌آن $\frac{m}{K}$ را بگذاریم زمان تناوب حرکت نوسانی وزنه و فنر

۱- مشتق $\cos\omega t$ برابر $-\omega\sin\omega t$ است.

۲- چون علامتهای y و a مخالف یکدیگر است باید هنگام عددگذاری رعایت علامت بشود تا زیر رادیکال مثبت گردد .

از رابطه زیر حساب می‌شود

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{m}{K}} \qquad (۱۱\text{-}۱۰)$$

دراین رابطه m جرم وزنه برحسب کیلو گرم (جرم فنر درمقابل m ناچیز گرفته شده‌است) و K ثابت فنر برحسب نیوتن برمتر و T زمان تناوب برحسب ثانیه است. هرچه جرم m بزرگتر باشد T بزرگتر و هرچه K بـزرگتر (یعنی فنر سختتر) باشد T کوچکتر است.

مثال ـ اگروزنه‌یك کیلو گرمی به‌انتهای‌فنری آویخته‌شود طول فنر ۰/۱۰ سانتیمتر افزایش‌می‌یابد.

الف ـ ثابت فنر را حساب‌کنید.

ب ـ اگرفنربااین وزنه بادامنه‌کم نوسان‌کند زمان تناوب آن را معین کنید.

الف) ـ اندازه ثابت فنر برابر است با :

$$K = \left|\frac{F}{y}\right| = \frac{۱(kg)\times ۹/۸۰\left(\frac{N}{kg}\right)}{۰/۱۰m} = ۹۸\frac{N}{m}$$

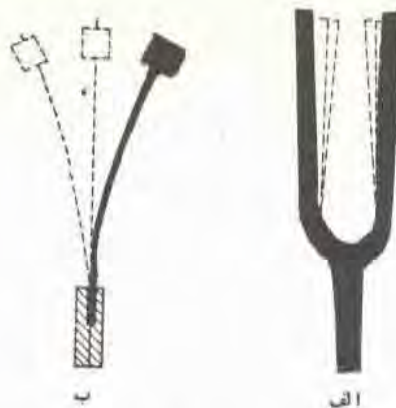
ب) ـ زمان تناوب این حرکت برابراست با :

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{m}{K}} = ۲\times ۳/۱۴\sqrt{\frac{۱}{۹۸}}$$

$$= ۲\times ۳/۱۴\sqrt{\frac{۱}{۲\times ۴۹}} = \frac{۳/۱۴}{۷}\sqrt{۲}$$

$$\simeq ۰/۶۳۴\,s$$

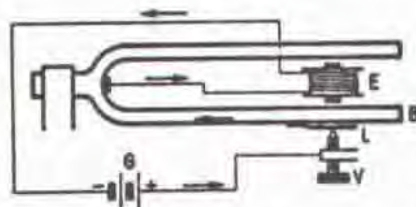
برای تولید حرکات ارتعاشی یانوسانی ساده می‌توان ازیك دیاپازن (شکل ۱۰ـ۶ الف) بایك تیغهٔ فنری که یك سرآن درجائی محکم شده و روی آن وزنه‌ای جابه‌جا می‌شود (شکل ۱۰ـ۶ ب) نیزاستفاده‌کرد. هرچه شاخه‌های دیاپازن نازکتر و طول آنها



شکل ۱۰ـ۶ـ از دیاپازن و تیغه فنری وزنه‌دار می‌توان برای تولید ارتعاشات ساده استفاده کرد.

بزرگتر باشد زمان تناوب آن بـزرگتر و در نتیجه فرکانس آن‌کمتراست .

دیاپازن به عنوان یك چشمه استاندارد مولد اصوات موسیقی توسط موسیقی‌دانان به‌کار می‌رود. علاوه براین درپاره‌ای ازموارد از دیاپازن برای ثبت زمانهای‌کوتاه‌مساوی‌ومتوالی (مثلاتا $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ ثانیه) استفاده می‌شود. در این صورت برای جلوگیری از کاهش تدریجی دامنه ارتعاش شاخه‌های دیاپازن، از یك دیاپازن الکتریکی استفاده می‌شود (شکل۱۰ـ۷)



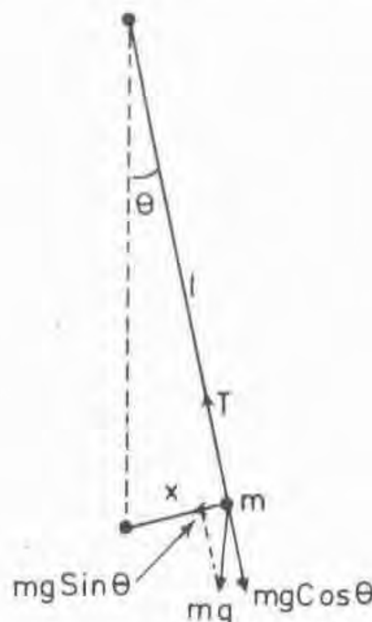
شکل ۱۰ـ۷ ـ دیاپازن الکتریکی وقتی که شاخه B دیاپازن ارتعاش می‌کند جریانی‌که ازآهن ربای الکتریکی E می‌گذرد در محل تماس تیغه فنری L و پیچ V مرتباً قطـع و وصل می‌گردد. هر بار که جریان‌وصل می‌شود آهن‌ربای الکتریکی شاخه‌های دیاپازن را جذب‌می‌کند و درنتیجه ضربه‌های متوالی که تواتر آنها برابر تواتر ارتعاشات دیاپازن است به‌شاخه‌ها وارد می‌شود و مانع میرائی دامنه می‌گردد .

پرسش ۱۰-۵ - دیاپازن را چگونه باید بسازند تا فرکانس ارتعاشات آن زیاد شود ؟

پرسش ۱۰-۶ - در چه صورت فرکانس تیغه فنری شکل ۱۰-۶ ب بیشتر می‌شود؟

پرسش ۱۰-۷ - به نظر شما چگونه می‌توان فرکانس یك دیاپازن را معین کرد ؟

۲- آونگ ساده - آونگ ساده چنان که می‌دانیم از یك گلوله کوچك به‌جرم m تشکیل یافته است که به انتهای نخی به جرم ناچیز آویزان است. اگر دامنه نوسان پاندول کوچك باشد (زاویه انحراف θ کمتر از ۶ درجه) می‌توان گفت که گرانیگاه گلوله روی یك خط تقریباً راست و افقی دارای حرکت نوسانی ساده‌است. اگر x اندازه انحراف گلوله از وضع تعادل باشد (شکل ۱۰-۸) زمان تناوب آونگ از رابطه



شکل ۱۰-۸- حرکت یك آونگ ساده با دامنه کوچك درحکم یك حرکت نوسانی ساده است .

زیر حساب می‌شود :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{-x}{a}} \qquad (10\text{-}12)$$

اندازه نیروی مؤثری کـه آونگ را به وضع تعادل برمی‌گرداند $mg\sin\theta$ است، زیرا نیروی‌وزن گلوله (mg) را می‌توان به دو همنه تجزیه کرد : یکی $mg\cos\theta$ در راستای نخ که برابر کشش نخ است و با آن خنثی می‌شود .

دیگری همنه $mg\sin\theta$ در راستای مماس بر مسیر حرکت گلوله و عمود برنخ که‌به‌گلوله‌شتاب می‌دهد اگر θ کوچك باشد به‌طوری‌که بتوان $\sin\theta$ را باخود θ (برحسب رادیان) برابر گرفت اندازه این همنه برابر $F=mg\theta$ است . اگر طول آونگ را به l نمایش دهیم داریم:

$$F=mg\frac{x}{l} \quad \text{و} \quad \theta=\frac{x}{l}$$

شتابی که جرم m در اثر این نیرو می‌گیرد از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$ma = -mg\frac{x}{l}$$

(علامت منفی برای این است که شتاب $\vec{a}$ و تغییر مکان $\vec{x}$ در خلاف جهت یکدیگرند) یا

$$-\frac{x}{a}=\frac{l}{g}$$

برای محاسبه T زمان تناوب آونگ کافی است در رابطه (۱۰-۱۲) به جای $\frac{-x}{a}$ معادل آن $\frac{l}{g}$ را بگذاریم بنابراین :

$$T \simeq 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (10\text{-}13)$$

دراین رابطه T زمان تناوب آونگ ساده‌ای است که بادامنه کم (از °۵ کوچکتر) نوسان می‌کند .

این رابطه نشان می‌دهدکه زمان تناوب آونگ ساده با جذر طول آن نسبت مستقیم و با جذر شتاب جاذبه نسبت معکوس دارد.

مثال - مطلوب است طول آونگ ساده‌ای که زمان نوسان کامل آن $T=۱/۰s$ است.

داریم :

$$l=\frac{gT^۲}{۴\pi^۲}=\frac{\left(۹/۸۰\frac{m}{S^۲}\right)\times(۱/۰s)^۲}{۴\times(۳/۱۴)^۲}\simeq ۰/۲۵m$$

پرسش ۱۰-۸ - چرا رابطه (۱۰-۱۲) در مواقعی که دامنه نوسان پاندول بزرگ باشد صدق نمی‌کند ؟

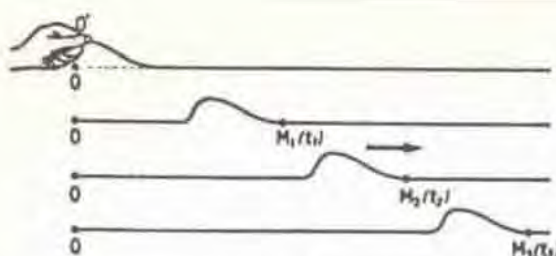
پرسش ۱۰-۹ - آزمایش نشان می‌دهد که زمان تناوب آونگ ساده بستگی به جنس وجرم آن ندارد. آیا می‌توانید علت آن را بیان کنید؟

چگونگی ایجاد و انتشار حرکات موجی

حرکت ارتعاشی هرجسم را می‌توان منبع تولید امواج مکانیکی دانست. برای این که یک جسم بتواند مرتعش شود و منبع تولید موج گردد چنان که دیدیم باید دارای دوشرط زیر باشد :

اولا هنگامی که ازوضع تعادل اولیه خود منحرف می‌شود و یاتغییرشکلی درآن به‌وجود می‌آیدنیروی برگرداننده‌ای تولید شودکه جسم را دوباره به‌وضع تعادل اولیه برگرداند.

ثانیاً قابلیت تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی وبرعکس را داشته باشد.



شکل ۱۰-۹- انتشار یک آشفتگی به‌صورت تک موج (پالس) درطول طناب

فنر ، تیغهٔ مرتعش ، دیاپازن ، سیم یک تار نمونه‌های خوبی برای تولید امواج مکانیکی هستند.

درنظر بگیریم که یک سرطناب یا فنر درازی را به‌جایی بسته وسردیگرش را در دست گرفته‌ایم وآن را در وضعی که بتواندموج را انتقال‌دهد نگاهداشته‌ایم. اگر دستمان را به‌سرعت بالا ببریم و به جای خود برگردانیم این حرکت دست در طناب یک آشفتگی تولید می‌کند که به صورت یک تک موج (به نام پالس[1]) مطابق شکلهای (۱۰-۹) و (۱۰-۱۰) در



شکل ۱۰-۱۰- انتشار یک پالس درطول یک فنرکه با عکاسی استربوسکپی تهیه شده است.

1- Pulse

طول طناب یا فنر انتشار می‌یابد.

این آشفتگی به هر نقطه از طناب که می‌رسد آن نقطه به‌طرف بالا حرکت می‌کند و پس از عبور آشفتگی دوباره به‌جای خود برمی‌گردد.

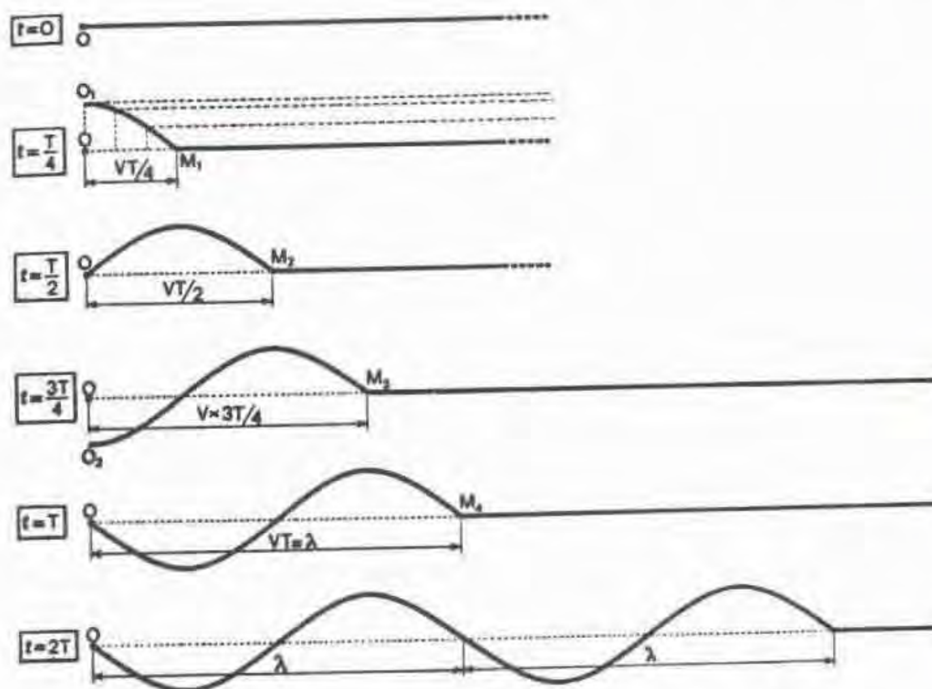
دراین‌جا یادآور می‌شویم که آشفتگی پس از رسیدن به‌انتهای طناب و برخورد به‌مانع برمی‌گردد ولی جهت آن معکوس می‌شود (دراین باره درجای خود بحث خواهیم کرد).

اگر به جای یک تکان سریع و ناگهانی، به وسیله‌ای یک‌حرکت نوسانی‌ساده ومداوم در راستای عمود برطناب باپرید T به سرطناب داده شود به جای یک‌آشفتگی، امواج ساده سینوسی که شکل آنها شبیه به‌منحنی سینوسی است مرتباً تولید و در طول طناب منتشرمی‌گردند. هر نقطه ازطناب به‌نوبه‌خود پس از زمانی‌که لازم است تا موج به‌آن نقطه برسد در جای خود با حرکت ارتعاشی نظیر حرکت مبدأ شروع به ارتعاش می‌کند.

شکل ۱۰-۱۱، ایجاد این امواج وانتشار آنها را درلحظه‌های ۰، $\frac{T}{۴}$، $\frac{T}{۲}$، $\frac{۳T}{۴}$، T و ۲T به‌ترتیب نشان می‌دهد

اقسام موجها

۱- موجهای عرضی - امواج عرضی به موجهایی گفته می‌شود که راستای انتشار آنها در یک محیط برامتدادارتعاش ذرات‌آن محیط عمودباشد. امواجی که درطول‌طناب‌مثال‌بالامنتشرمی‌شوندازنوع امواج عرضی هستند زیرا امتداد ارتعاش هر نقطه از طناب برراستای انتشار موج عمود است. امواجی هم که به‌صورت برجستگیها وفرو رفتگیهای دایره‌ای‌شکل

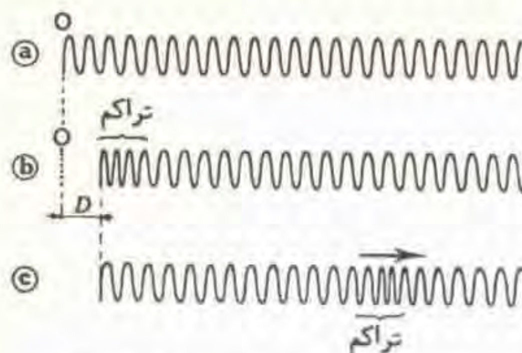


شکل ۱۰-۱۱- انتشار ارتعاشات ساده (سینوسی) در طول یک طناب

برسطح آب منتشرمی‌شوند چنان‌که می‌دانیم ازنوع موجهای عرضی هستند.

۲ـ موجهای طولی ـ امواج‌طولی موجهایی‌هستند که راستای انتشارآنها دریك محیط باراستای‌ارتعاش ذرات محیط یکی است. مثلا اگرچند حلقه ازسریك فنرنرم و دراز را که با نیروی کمی کشیده شده است به هم نزدیك کرده و رها سازیم این حلقه‌ها دوباره ازهم باز می‌شوند ولی حلقه‌های مجاور آنها به هم نزدیك‌می‌گردند و این تراکم وانبساط مرتباً درطول فنرمنتشرمی‌شودتابه‌انتهای‌آن‌برسد (شکل ۱۰-۱۲) وقتی‌هم یك دیاپازن درهوامرتعش می‌شودشاخه‌های آن مولکولهای هـوای مجاور خود را به ارتعاش درمی‌آورند. این ارتعاشها مولکول به مولکول به صورت یك رشته تـراکم و انبساط متوالی به شکل امواج‌طولی‌وبه‌نام‌موجهای‌صوتی‌درتمام‌جهات‌درهوا انتشار می‌یابند (به‌بخش حرکات موجی‌کتاب فیزیك سال دوم مراجعه‌کنید) .

۳ـ موجهای پیچشی ـ اگر سر فنر را که در دست داریم در جهت موافق و مخالف حرکت عقربه‌های ساعت بایك حرکت نوسانی منظم بچرخانیم یك‌نوع حرکت نوسانی به‌صورت تغییرمکان زاویه‌ای درفنر ایجاد می‌شود و درطول آن انتشار می‌یابد. این‌نوع امواج را موجهای پیچشی نامیده‌اند در این نـوع امواج، حرکت نوسانی ذرات محیط ، دریك صفحه عمود برامتداد انتشار موج صورت می‌گیرد. هرسه نوع‌این‌موجها می‌توانند درجامدات منتشرشوندولی درمایعات وگازها فقط امواج طولی انتشارمی‌یابند، یعنی مولکولهای هوا یاآب فقط در راستای انتشار



شکل ۱۰-۱۲ـ انتشار یك آشفتگی طولی دریك فنر

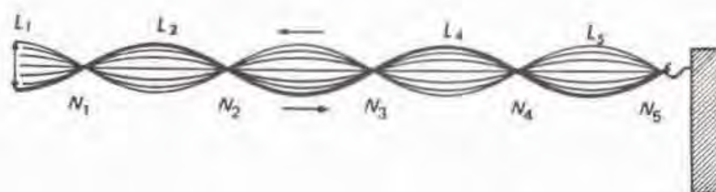
موج می‌توانند نوسان‌کنند.

موج عرضی دارای ویژگی خاصی است که آن را از دونوع موج طولی وپیچشی‌متمایزمی‌کند: درموج طولی، ارتعاش فقط در راستای انتشار موج صورت می‌گیرد، درموج پیچشی هم ارتعاش فقط به دور محور انتشار موج انجام می‌شود ولی در موج عرضی امتداد ارتعاش عمود برراستای انتشار موج است و تعداد راستاهـای عمود بـرراستای انتشار نامحدود است . مثلا برای تولید امواج عرضی در طول‌یك طناب افقی می‌توان سرطناب را در راستای قائم‌یاهرراستای دیگری‌که‌عمود برامتداد طناب‌باشد حرکت نوسانی داد .

وقتی‌که راستای ارتعاش یك‌موج عرضی‌ثابت بماند به‌عبارت دیگر راستاهای انتشار و ارتعاش در یك صفحه قرار داشته‌باشند می‌گوئیم موج «پلاریزه» است .

پرسش ۱۰-۱۰ ـ با چه وسیله‌ای می‌تـوان تشخیص داد کـه امواج عرضی در طول یـك طناب پلاریزه هستند؟

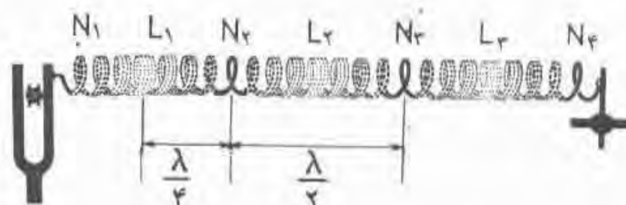
۴ـ موجهای ایستاده ـ این موجها را به‌این جهت



شکل ۱۵–۱۳– امواج ایستاده حاصل از ترکیب امواج عرضی و بازتابش آنها در طول یك طناب. خط پررنگ نمایش وضع طناب در یك لحظه مورد نظر و خطهای کم‌رنگتر نمایش وضع طناب در لحظه‌های دیگر است.

ایستاده می‌گویند که برخلاف امواجی که شرح آنها گذشت در محیط منتشر نمی‌شوند. تقریباً تمام صوتهای حاصل از اسبابهای موسیقی، درنتیجهٔ تشکیل امواج ایستاده به وجـود می‌آیند. مـوجهای ایستاده را می‌توان درهرنوع ماده اعم ازجامد یامایع ویاگاز به‌وجود آورد و برای تولید آنها کافی است دو دسته موج هم فرکانس را درخلاف جهت یکدیگر درمحیط مورد نظر انتشار داد. درشکل (۱۰–۱۳) چگونگی تشکیل موجهای ایستاده به‌وسیله امواج عرضی در یك طناب نشان داده شده است :

یك سرطناب به پایه‌ای بسته شده است و سر دیگر آن باحرکت نوسانی ساده‌ای به‌ارتعاش درمی‌آید. موجهای حاصل ازاین ارتعاش درطول طناب منتشر می‌شوند و پس از رسیدن به‌انتهای طناب و برخورد به‌مانع برمی‌گردند و باامواجی که به‌طرف مانع پیش می‌روند برخوردمی‌نمایند. اگرفرکانس‌منبع‌ارتعاش، یا طول طناب وکشش آن درست و مناسب انتخاب شود در طول طناب مطابق شکل ، امواج ایستاده به وجـود می‌آید . یعنی در پاره‌ای از نقاط ، مانند L_1 ، L_2 و ... طناب به‌شدت مرتعش می‌شود. این نقاط که بیشترین دامنه حرکت را دارند شکم نامیده می‌شوند. نقاط دیگری مانند N_1 ، N_2 و ... که در فواصل بین شکمها قرار دارند بی‌حرکت می‌مانند، این نقاط گره نامیده می‌شوند . در شکل (۱۰–۱۴) چگونگی تشکیل امواج ایستاده دریك فنر به وسیله امواج طولی نشان داده شده است . یك سر فنر به پایه‌ای بسته‌شده‌است وسردیگرآن‌توسط‌شاخهٔدیاپازنی که درحال ارتعاش است به‌جلو وعقب برده می‌شود برای اینکه امواج ایستاده به خوبی در فنر ایجاد شوند بایدفرکانس دیاپازن یاطول وکشش فنردرست و مناسب اختیار شود. (عـلت تشکیل مـوجهای ایستاده را بعداً خواهیم دید).



شکل ۱۵–۱۴– چگونگی تشکیل امواج طولی ایستاده دریك فنر

سرعت انتشار امواج در یك محیط همگن ـ در یك محیط همگن کـه شرایط فیزیکی تمام نقاط آن یکسان است[1]، امواج درتمام جهات با سرعت ثابت منتشر می‌شوند. به همین جهت مثلا امواج درسطح آب به شکل دایره پخش می‌گردند . آزمایش نشان می‌دهد که :

اولاً ،سرعت انتشار موج دریك محیط‌بستگی به شکل موج ودامنه آن ندارد بەشرط این که تغییر شکلی که دراثر انتشار موج درمحیط حاصل می‌شود خیلی بزرگ نباشد.

ثانیاً، سرعت انتشارموج دریك محیط‌بستگی به جنس آن محیط وشرایط فیزیکی آن دارد . مثلا سرعت انتشار موجهای عرضی درطول یك طناب‌در حالت عادی ازرابطهٔ زیر حساب می‌شود[2].

$$V=\sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (۱۴-۱۰)$$

که درآن F نیروی کشش طناب برحسب نیوتن و μ جرم‌واحدطول‌طناب برحسب‌کیلوگرم برمتر و V سرعت انتشار موج برحسب متربرثانیه است.مثلا سرعت انتشار یك ضربه (موج عرضی) دریك طناب لاستیکی به‌طول ۵ مترو به‌جرم ۰/۵ کیلوگرم (یعنی با جرم واحد طول $\mu=\frac{۰/۵}{۵}=۰/۱\frac{kg}{m}$) که با نیروی ۱۰ نیوتن کشیده شده باشد برابر است با:

$$V=\sqrt{\frac{F}{\mu}}=\sqrt{\frac{۱۰}{۰/۱}}=\sqrt{۱۰۰}=۱۰\frac{m}{s}$$

۱ــ محیطی که شرایط فیزیکی درتمام جهات درآن یکسان‌است محیط ایزوتروپ نامیده میشود.

۲ــ سرعت انتشار امواج طولی در یک محیط بستگی به خاصیت کشسانی (الاستیک) آن محیط دارد و می‌توان آن را به صورت کلی زیر نوشت :

$$V=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

که در آن ρ جرم حجمی محیط و E معرف خاصیت کشسانی محیط‌است، و "مدول الاستیک "نامیده می‌شود .

E بستگی به نوع محیط دارد . مثلا" برای سیالها (مایعات و گازها) ، E مدول الاستیک حجمی‌است (که معمولا به B نمایش داده می‌شود) و تعریف آن چنین است .

$$E=\frac{\text{تغییر فشار در محیط}}{\text{تغییر حجم حاصل‌در واحد حجم (در اثر تغییرفشار)}}=\frac{\Delta P}{\Delta V/V}=V\frac{\Delta P}{\Delta V}$$

برای یک جسم جامد به شکل میله ، E " مدول یانگ" نامیده می‌شود (که معمولا" به Y نمایش داده می‌شود) و تعریف آن چنین است .

$$E=\frac{\text{تغییر فشار}}{\text{تغییر طول واحد طول میله (در اثر تغییر فشار)}}=\frac{\Delta P}{\Delta \ell/\ell}=\ell\frac{\Delta P}{\Delta \ell}$$

طول موج - طول موج بنا بـه تعریف، مسافتی است که مـوج درمدت یك پرید می‌پیمـاید، هرگاه منبع مـولد مـوج دارای حـرکت نوسانی ساده بـا تواتر f و پرید T باشد و امـواج حاصل از آن با سرعت ثابت V دریك محیط منتشرشوند طول موج بـر اساس تعریف بالا به صورت رابطه زیـر نمایش داده می‌شود:

$$\boxed{\lambda = VT = \frac{V}{f}} \qquad (۱۰-۱۵)$$

شکل ۱۰-۱۱ نشان می‌دهدکه طول موج‌فاصله دو نقطه متوالی از محیط انتشار موج است کـه وضع ارتعاشی آنها یکسان می‌باشد.

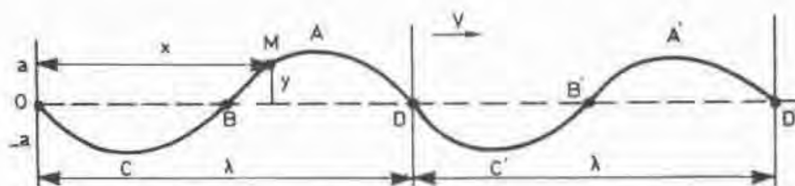
بایدتوجه داشت‌که T یا f فقط ازویژگیهای حـرکت ارتعاشی منبع ارتعـاش است و V فقط از ویـژگیهای محیطی است‌که حرکت ارتعاشی در آن انتشار می‌یابد، بنابراین اهمیت رابطه ۱۰-۱۵ در این است‌که ارتباط این ویژگیها را نشان می‌دهد.

بررسی وضع ارتعاشی هر نقطه از محیط انتشار- می‌خواهیم وضع ارتعاشی یـك نقطه غیرمشخص از محیط انتشار موج را که به فاصله x ازمبدأ ارتعاش واقع شده است در یـك لحظهٔ غیرمشخص t بررسی کنیم. شکل ۱۰-۱۵ وضعیت یـك طناب را موقعی نشان می‌دهد که نقطه o (سر طناب) دو ارتعاش کامل درراستای عمود بر طناب انجام داده و به محل آغاز حرکت خود برگشته است و امواج حاصل از این حرکت در طول طناب منتشر شده‌اند.

(مبدأ زمان یعنی لحظهٔ $t_0 = 0$ را طوری انتخاب کرده‌ایم کـه بعد اولیه نقطه o صفر بـوده است) اگـر دامنه ارتعاش مبدأ o را بـه **a**[1] نمایش دهیم بعد حـرکت آن در لحظهٔ غیرمشخص t برابر خواهد بود با :

$$y_0 = a \sin\frac{2\pi}{T} t$$

در لحظه‌ای‌که مبدأ o پس ازانجام یك نوسان کامل می‌خواهد نوسان بعدی را شروع کند، نقطه D که بـه فاصله $\lambda = VT$ از مبدأ o واقع است نخستین نوسان خود را نسبت به‌نقطه o پس ازگذشت زمان $t_D = T = \frac{\lambda}{V}$ آغاز می‌کند . به همین ترتیب ، حرکت ارتعاشی یك نقطه غیرمشخص مانند M که به فاصله x ازمبدأ o واقع است پس ازگذشت‌زمان $t_M = \frac{x}{V}$ آغـاز می‌شود . به عبارت دیگر حرکت ارتعاشی نقطه M نسبت به حـرکت ارتعاشی مبدأ o به‌اندازه زمان $t_M = \frac{x}{V}$ تأخیر دارد . بنابراین اگر کاهش دامنه نوسان (به سبب اصطکاك) ناچیز



شکل ۱۰-۱۵- موجهای عرضی که از چپ به راست انتشار می‌یابند.

۱- a حرف اولیه‌کلمه amplitude به معنای دامنه است وازاین‌پس دامنه به a نمایش داده‌شده است.

باشد می‌توان گفت که بعد حرکت ارتعاشی نقطه M درلحظهٔ t همان است که نقطه o درلحظه $t-t_M$ داشته است یعنی:

$$y_M = a \sin \frac{2\pi}{T}(t - t_M)$$

که اگر به جای t_M مقدار $\frac{x}{V}$ وبه‌جای VT معادل آن λ را بگذاریم خواهیم داشت:

$$\boxed{y_M = a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)} \quad (16-10)$$

زاویه $2\pi\frac{x}{\lambda}$ را اختلاف فازبین حرکتهای ارتعاشی نقطه M و مبدأ o می‌نامند. اگر حرکت ارتعاشی مبدأ o ادامه‌یابد درطول‌طناب‌نقاطی مانند D وD′ و . . . یافت می‌شوند کـه با مبدأ o در یك وضع ارتعاشی هستند.

فاصله‌این نقاط از مبدأ به‌ترتیب λو2λو... وkλ است(k عددی درست ومثبت است) می‌گوئیم این نقاط با مبدأ «هم فاز» هستند. فاصله این نقاط از یکدیگـر نیز مضرب درستی از λ است بنابراین کلیه نقاطی که فاصله‌هایشان از مبدأ ارتعاش یا از یکدیگر مضرب درستی از λ است هم فاز هستند.

پرسش ۱۰-۱۱- چگونه بااستفاده ازاختلاف فاز $2\pi\frac{x}{\lambda}$ می‌توان این کیفیت را با محاسبه نشان داد ؟

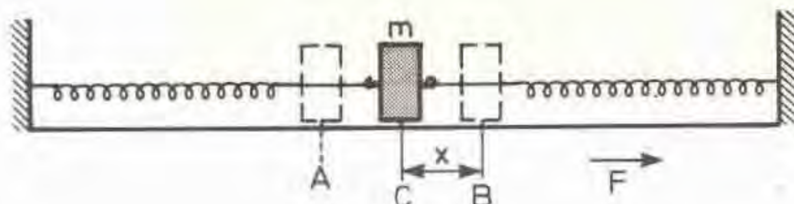
نقاط A وA′و... به‌وضع بیشترین تغییرمکان خود درجهت بالا رسیده‌اند. این نقاط نیز بایکدیگر هم فاز هستند.نقاط C وC′و... هم به‌وضع بیشترین تغییر مکان خود ولی در جهت پائین رسیده‌اند و با یکدیگر نیز هم فازند ولی جهت حرکت ارتعاشی نقاط A وC خلاف یکدیگر است: می گوئیم این نقاط نسبت به هم در «فاز متقابل» هستند.

نقاطی مانند B وB′و... درطول طناب وجود دارندکه با مبدأ در فاز متقابلند یعنی جهت حرکت وسرعت آنها خلاف جهت‌حرکت وسرعت مبدأاست فاصله این نقاط ازمبدأ به ترتیب $\frac{\lambda}{2}$ ، $3\frac{\lambda}{2}$ ، ... و $(2k+1)\frac{\lambda}{2}$ است.

به طور کلی نقاطی کـه فاصله آنها از مبدأ ارتعاش یا از یـکدیـگر مضرب فردی از نصف طول موج‌باشد نسبت به‌مبدأیا نسبت به‌هم درفازمتقابلند.

انرژی حرکات ارتعاشی - وقتی‌که‌جسمی‌یامحیطی به ارتعاش درمی‌آید انرژی مکانیکی که صرف ایجاد ارتعاش می‌شود، در اثر حرکت ارتعاشی خود جسم یا اجزاء محیط مرتباً ازصورتی‌به‌صورت دیگرتبدیل می‌گردد.مثلا اگرجرم m که مطابق شکل ۱۰-۱۶ میان دوفنربسته شده است، دراثر نیروی $F=kx$ به اندازه بعـد x از وضع تعادل منحرف شود کار نیروی F،چنان‌که دیدیم بـه‌صورت انرژی پتانسیل $\frac{1}{2}kx^2$ درفنرها ذخیره‌می‌شود ($k=k_1+k_2$ ثابت دوفنر است). هرگاه وزنه m رهاگـردد این انرژی تبدیل به انرژی جنبشی می‌شود و هنگامی‌که وزنه ازوضع تعادل اولیه خـود (نقطه C) می‌گذرد اگر اصطکاکی درکار نباشد، تمام انرژی پتانسیل آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.

اگردامنه نوسان وزنه را به a نمایش دهیم



شکل ۱۵-۱۶- جرم m بین دوفنریکسان حرکت نوسانی انجام می‌دهد.

می‌توانیم بنویسیم :

$$E = \frac{1}{2}ka^2 = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (17\text{-}10)$$

v سرعت حرکت وزنه به‌هنگام عبور ازوضع تعادل است.

معادله بالا نشان می‌دهدکه انرژی حرکت ارتعاشی با مجذور دامنه ارتعاش متناسب است‌یعنی:

$$E \propto a^2$$

متناسب بودن انرژی حرکت ارتعاشی با مجذور دامنه یك موضوع‌اساسی است ودرباره هرنوع موج وحرکت ارتعاشی صادق است.

خودتان آزمایش کنید

الف- نمودار تغییرات l، طول یك آونگ ساده را با T^2، مجذور زمان تناوب آونگ رسم‌کنید واز روی آن طول آونگ ساده دیگری را معین‌کنید.

ب- شتاب جاذبه زمین را حساب‌کنید.

وسائل لازم : یك گلوله فلزی کوچك قلاب‌دار، نخ باریك ومحکم (مانند نخ قرقره)، کرونومتر، کولیس، پایه وگیره، یك قطعه چوب پنبه معمولی نسبتاً بزرگ‌که آن را از وسط‌در امتداد قطر به‌دو نیمه کرده‌اید ویك قطعه گچ، خط‌کش مدرج بلند یا متر فلزی.

۱- آونگ ساده‌ای به ترتیب زیر فراهم کنید:

یك سرقطعه نخی به‌طول تقریبی ۱/۵ متر را به قلاب گلوله قلاب‌دار ببندید وسر دیگر نخ را از وسط دوقطعه چوب پنبه بگذرانید وچوب پنبه را میان گیره‌ای‌که به یك پایه بسته‌اید وآن را روی میز یا چهارپایه یا صندلی چوبی ویا نیمکت قرار داده‌اید محکم‌کنید به طوری‌که دولبهٔ پائینی چوب پنبه درست مقابل هم قرارگیرند وبتوانید با کشیدن نخ از وسط چوب پنبه طول پاندول را تغییر دهید. (ممکن است درمیان وسائل آزمایشگاهی، گیره‌هائی مخصوص نگاهداشتن نخ آونگ باشدکه بتوان نخ را ازوسط آنها گذراند. اگر چنین گیره‌هائی درآزمایشگاه موجود است از آنها استفاده کنید).

۲ـ طول آونگ را ابتدا در حدود ۱۲۰ سانتیمتر انتخاب کنید، طول آونگ برابر فاصله گرانیگاه گلوله ازآویزگاه آن است. برای تعیین آن، قطر گلوله را با کولیس اندازه بگیرید و فاصله میان لبهٔ پـائین چوب پنبه و محل اتصال قلاب به گلوله را با دقت معین نمـائید و این فاصله را با شعاع گلوله جمع کنید. طول آونگ بهدست خواهد آمد.

۳ـ گیره را روی پایه طوری تنظیم کنید که گلوله آونگ نزدیك کف اتاق قرار گیرد و با قطعه گچ خط کوتاهی روی کف اتاق موازی با لبهٔ میز یا صندلی که پـایه آونگ را روی آن گذارده‌اید بکشید وخط کوتاه دیگری عمود بروسط این خط رسم کنید و آونگ را طوری تنظیم نمائید که گلوله آن درست بالای محل تقاطع دوخط قرار گیرد (شکل ۱۰-۱۷)



شکل ۱۰-۱۷

۴ـ کار کرونومتر را امتحان کنید وعقربه آن را روی صفر بیاورید. گلوله آونگ را به اندازه چهار یا پنج سانتیمتر روی خطی که موازی لبهٔ میز کشیده‌اید منحرف کرده و رها سازید و لحظه‌ای که ازوضع تعادل اولیه (یعنی ازمقابل محل تقاطع دوخط روی‌زمین) می گذرد کرونومتر را به راه اندازید و زمان ۲۰ نوسان کامل آن را اندازه بگیرید ودرآخرین نوسان، لحظه‌ای که آونگ بـه محل تقاطع دوخط مـی‌رسد کرونومتر را متوقف کنید و زمان ۲۰ نوسان کامل را بخوانید و زمان یك نوسان کامل آونگ را حساب کنید.

۵ـ طول آونگ را با کشیدن نخ از میان دو نیمه چوب پنبه ۱۰ سانتیمتر کم کنید و با پائین آوردن گیره روی پایه، گلوله را نزدیك کف اتاق قرار دهید و دوباره زمان ۲۰ نوسان کامل آن را اندازه بگیرید. بههمین ترتیب درآزمایشهای بعدی طول آونگ را ۱۰ سانتیمتر، ۱۰ سانتیمتر کم کنید و هربار گیره را پائین آورید تا گلوله نزدیك کف اتاق قرار گیرد و زمان

۲۰ نوسان کامل آن را اندازه بگیرید. برای این که بتوانید نمودار تغییرات l با $T^۲$ را رسم کنید ۵ طول مختلف کافی است.

۶ـ زمان تناوب T را برای هرطول l حساب کنید و$T^۲$را معین نمائید سپس نسبت$\frac{l}{T^۲}$ را برای هرآزمایش جداگانه حساب‌کنید ومیانگین آنها را به‌دست‌آورید ومقدار g شتاب جاذبه را از رابطه $g=۴\pi^۲\frac{l}{T^۲}$ حساب کنید.

۷ـ روی کاغذ میلیمتری دومحورعمود برهم رسم‌کنید. روی محور افقی طولهای‌آونگ و روی محور عمود برآن مجذور زمان تناوبهای مربوط به‌آنها را ببرید ونمودار تغییرات $T^۲$ را برحسب l رسم‌کنید. این نمودار باید یك خط راست باشد. از روی این نمودار طول‌آونگ ساده‌ای را که زمان نوسان کامل آن در دست است (مثلا ۲ ثانیه) به وسیله انترپولاسیون یا اکستراپولاسیون پیدا کنید ، نتایج آزمایش را می‌توانید در جدولی مانند جـدول ۱۰-۱ ثبت کنید. تحقیق کنید که بین زمانهای نوسان دو پاندول و طولهای آنها رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{T_۱}{T_۲}=\frac{\sqrt{l_۱}}{\sqrt{l_۲}}$$

$\frac{۱}{T^۲}$	$T^۲$	زمان نوسان‌کامل‌آونگ $T=\frac{t}{۲۰}$	زمان۲۰ نوسان‌کامل‌آونگ میانگین (t)	۲	۱	طول آونگ (l)	شماره آزمایش
							۱
							۲
							۳
							۴
							۵
$g=۴\pi^۲\frac{l}{T^۲}=\ldots.$							اندازه‌میانگین $\frac{l}{T^۲}=\ldots.$

جدول ۱۰-۱

خطاهائی که ممکن است درضمن انجام آزمایش پیش آید و باید تا ممکن است از آنهـا اجتناب کنید عبارتند از :

۱ـ خطای شخص در براه انداختن یا نگاهداشتن کرونومتر.

۲ـ نوسانهای پایه اگر تعادل آن پایدار نباشد.

۳ـ خاصیت کشسانی نخ ودر نتیجه زیاد شدن طول آونگ به هنگام نوسان.

طول آونگ را با دقت میلیمتر اندازه بگیرید. برای این که اندازه‌گیری زمان نوسان T دقیقتر باشد توصیه می‌شود که تعداد نوسانات کامل بیشتری را اندازه بگیرید.

به این پرسشها پاسخ دهید

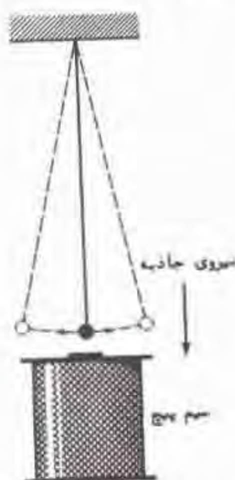
۱) ـ این اصطلاحات را به اختصار ولی دقیق تعریف کنید:

ارتعاش، تواتر، دامنه، فاز

۲) ـ چه نوع حرکتی را حرکت نوسانی ساده گویند؟ آیا یک‌آونگ ساده‌که مثلا بازاویه °۶۰ نوسان می‌کند دارای حرکت نوسانی ساده است؟

۳) ـ چگونه می‌توان یک حرکت نوسانی ساده را به‌وسیله حرکت یک نقطه برروی دایره نمایش داد؟

۴) ـ درنظر بگیریدکه زیر گلولهٔ‌یک‌آونگ ساده‌به‌طول l که ازفولادساخته‌شده وجرم‌آن m است یکی ازقطبهای یک آهن ربای الکتریکی قرار داده شده است (شکل ۱۰-۱۸) و در دامنه کوچکی‌که آونگ نوسان می‌کند، آهن‌ربا با نیروی ثابت F گلوله را جذب می‌نماید رابطه‌ای بنویسیدکه زمان تناوب آونگ را دراین حالت نشان دهد.



شکل ۱۵-۱۸- علاوه بر نیروی جاذبه، نیروی دیگری رو به پائین برگلوله آونگ توسط آهن‌ربا وارد می‌شود و زمان تناوب آن را تغییر می‌دهد.

۵) ـ یك منبع تولید امواج مکانیکی چه شرایطی باید داشته باشد؟
۶) ـ چه نوع امواج مکانیکی در جامدات منتشر میشوند؟
۷) ـ چه نوع امواج مکانیکی درمایعات وگازها منتشر میشوند؟
۸) ـ چه نوع امواجی پلاریزه میشوند؟
۹) ـ درنظر بگیرید حیوانی مثلا یك گربه یا یك موش زیر پتوئیکه برکف اتاق گسترده است حرکت میکند. آیا آشفتگی که در اثر حرکت حیوان در پتو ایجاد میشود موج است ؟ توضیح دهید.
۱۰) ـ سرعت انتشار امواج در یك محیط به چه عواملی بستگی دارد و چه عواملی در این سرعت مؤثر نیستند؟
۱۱) ـ دومثال بیاوریدکه انتقال انرژی بهوسیله انتقال ماده صورت میگیرد.
۱۲) ـ دومثال بیاوریدکه انتقال انرژی به وسیله موج صورت میگیرد.
۱۳) ـ از عاملهای تواتر، طول موج ، زمان تناوب، دامنه و پلاریزاسیون کدامشان :
الف ـ وضعیت مکانی موجها را بیان میکنند؟
ب ـ وضعیت زمانی موجها را بیان میکنند؟
۱۴) ـ اهمیت رابطه $\lambda = VT$ در چیست؟
۱۵) ـ اگر موجی سینوسی نباشد چگونه میتوان طول موج آنرا تعریف کرد؟
۱۶) ـ سرعت انتشار امواج عرضی در یك سیم به طول ۶ متر وبه جرم ۶۰ گرم که با نیروی ۱۰۰۰ نیوتن کشیده شده است چند متر بر ثانیه است؟
۱۷) ـ ازکمیتهای زیرکه مربوط بهموج هستندکدامیك بستگی به سهکمیت دیگر ندارد؟
۱ـ سرعت ۲ـ طول موج ۳ـ دامنه ۴ـ تواتر
۱۸) ـ امواج صوتی حاصل از یك منبع صوت در هوا بـه شکل کره منتشر میشوند . هرگاه شعاع کره موج دو برابر شود چگالی انرژی صوتی (انرژی صوتی درواحد سطح کره)
۱ـ دوبرابر میشود ۲ـ نصف میشود ۳ـ چهاربرابر میشود ۴ـ ربع میشود
در جواب درست بحث کنید.

این مسئلهها را حل کنید

۱) ـ دیاپازنی میتواند با تواتر ۶۰۰ هرتز مرتعش شود. هرگاه این دیاپازن بهارتعاش در آید و سرعت انتشار صوت در هـوا ۳۴۰ متر بر ثانیه باشد صوت حـاصل از این دیاپازن

پس از چند ارتعاش کامل آن به گوش شنونده‌ای که در فاصله ۲۰ متری دیاپازن قرار دارد خواهد رسید؟

جواب : پس از ۳۵ ارتعاش کامل

۲) ـ ذره‌ای روی یك خط راست دارای حرکت نوسانی ساده است. اگر بیشترین مقدار سرعت آن $\frac{m}{s}$ ۰/۴۷ و زمان نوسان کامل آن s ۰/۸۰ باشد.

الف ـ دامنهٔ نوسان ذره را حساب کنید.

ب ـ بیشترین مقدار شتاب این ذره چه اندازه است؟

جواب : الف) ـ تقریباً 6cm ب) ـ تقریباً $3/69 \frac{m}{s^2}$

۳) ـ هرگاه به انتهای یك فنر که از جرم آن صرف‌نظر می‌شود وزنه ۳۵۰ گرمی بیاویزیم و آن را در راستای قائم با دامنهٔ کم به نوسان درآوریم ودر هردقیقه ۸۷ نوسان کامل انجام می‌دهد. چنانچه به انتهای این فنر وزنه ۱۷۵ گرمی آویخته شود چند نوسان کامل دردقیقه انجام خواهد داد؟

جواب : تقریباً ۱۲۳ نوسان

۴) ـ در مکانی که شتاب جاذبه زمین $g = 9/8150 \frac{m}{s^2}$ است زمان نوسان آونگ یك ساعت دیواری ۱/۲۵۵۰ ثانیه است. اگر این ساعت به مکانی برده شود که شتاب جاذبه در آن جا $g' = 9/7950 \frac{m}{s^2}$ باشد وطول پاندول ثابت بماند زمان نوسان کامل آونگ را در این مکان تا ۵ رقم معنی‌دار حساب کنید. چه تغییری درمدت ۲۴ ساعت در زمانی که ساعت نشان می‌دهد حاصل خواهد شد؟

جواب : ۱/۲۵۶۳ ثانیه و ۱ دقیقه ۲۹/۵ ثانیه تقریباً ساعت عقب خواهدرفت

۵) ـ آونگ ساده‌ای تشکیل شده است از گلولهٔ کوچکی که به سیم فولادی باریکی آویزان است ودر دمای $20°C$ زمان نوسان کامل آن $2/00s$ است اگردمای محیط به $40°C$ برسدچه‌تغییری درزمان‌نوسان‌آن‌حاصل‌خواهدشد؟ضریب‌انبساط‌خطی‌فولاد$(°C^{-1})$ 11×10^{-6} است.

جواب: $2/20 \times 10^{-4}$ ثانیه افزایش می‌یابدکه با توجه به دقتی که درتعیین زمان نوسان در صورت مسئله به‌کار رفته است عملاً محسوس نیست.

۶) ـ دو آونگ ساده A و B را با هم با دامنهٔ کم به نوسان درمی‌آوریم پس ازگذشت زمان ۵ دقیقه و ۲۴ ثانیه آونگ B یك نوسان‌کامل از آونگ A جلو می‌افتد اگر زمان‌نوسان

کامل آونگ A برابر ۲/۰۰ ثانیه باشد نسبت طول آونگ A به‌طول آونگ B را حساب کنید.
جواب: این نسبت تا ۵ رقم معنی‌دار ۱/۰۱۲۴ است.

۷) ـ یك سرطنابی‌را با حرکت نوسانی ساده عمود بر راستای طناب با تواتر ۲/۵ هرتز به نوسان در می‌آوریم. اگر سرعت انتشار امواج حاصل، در طول طناب $۱۰\frac{m}{s}$ باشد

اولاً، طول موج این امواج‌را حساب کنید.

ثانیاً، اگر جرم هرمتر طناب ۵۰ گرم باشد طناب با چه نیرویی کشیده شده است؟

جواب: $\lambda=۴m$ و $F=۵N$

۸) ـ به‌انتهای آزاد یك تیغهٔ فنری که با تواتر ۱۰۰ هرتز ارتعاش می‌کند میلهٔ کوتاهی عمود برراستای تیغه نصب شده‌است ونوك آن با سطح‌آب، درون ظرفی تماس‌دارد به‌طوری‌که وقتی تیغه مرتعش می‌شود نوك میله برروی سطح آب امواج عرضی با دامنه ۲ میلیمتر تولید می‌کندکه به‌شکل دایره با سرعت ۰/۳۷ متر برثانیه برسطح‌آب منتشر می‌شوند:

اولاً، معادله حرکت ارتعاشی مبدأ را دریك لحظهٔ غیر مشخص t بنویسید.

ثانیاً، معادله ارتعاشی یك نقطه M راکه به‌فاصله ۱۴/۸ میلیمتر از مبدأ ارتعاش واقع است در لحظهٔ t بنویسید (فرض کنید که دامنه ارتعاش در این مسیر کوتاه ثابت می‌ماند). چه مدت طول می‌کشد تا پس ازشروع حرکت ارتعاشی مبدأ، نخستین موج حاصل ازآن به‌نقطه M برسد؟ بعد حرکت نقطه M پس ازگذشت یك ثانیه ازشروع حرکت مبدأ چه‌اندازه است؟

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۰

۱۰-۱) ـ تواتر حرکت نوسانی بر روی قطر دایره مرجع برابر تعداد دورهای متحرك در ثانیه بر روی محیط دایره است

۱۰-۲) ـ $x=r\cos\omega t$

۱۰-۳) ـ معمولا برحسب رادیان

۱۰-۴) ـ در لحظه‌هائی‌که $\cos\frac{۲\pi t}{T}=۰$ باشد یعنی $\frac{۲\pi t}{T}=(۲k-۱)\frac{\pi}{۲}$

و یا: $t=(۲k-۱)\frac{T}{۴}$

برای مدت یك پرید داریم: $t_۱=\frac{T}{۴}$ (به‌ازای $k=۱$) و $t_۲=۳\frac{T}{۴}$ (به‌ازای $k=۲$)

۱۰-۵) - باید شاخه‌های دیاپازن را کوتاه و ضخیم بسازند.

۱۰-۶) - در صورتی که طول تیغه کوتاهتر یا وزنه روی آن پایینتر باشد.

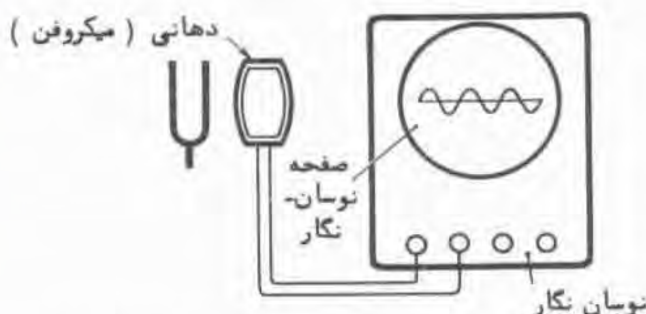
۱۰-۷) - فرکانس یك دیاپازن (یا هرجسم مرتعش را) بسته به امکانات اندازه‌گیری، به چند روش می‌توان معین کرد:

الف - به‌وسیله ثبت ارتعاشات - به‌این ترتیب که به‌نوك شاخه دیاپازن الکتریکی تیغهٔ فنری نوك تیزی را نصب می‌کنند و نوك تیغه را روی صفحه دوده اندوده دستگاه ثبات که با حرکت یکنواخت حرکت می‌کند (نظیر شکل ۱۰-۵) تماس می‌دهند، ودر مدت کاملا معینی ارتعاشات دیاپازن را ثبت می‌نمایند و ارتعاشات کامل آن را در واحد زمان معین می‌کنند در این روش می‌توان ارتعاشات ثبت شده دیاپازن را با ارتعاشات ثبت شده یك جسم مرتعش استاندارد مقایسه کرد.

ب - به‌وسیلهٔ نوسان نگار کاتدی - نوسان‌نگار کاتدی که اساس‌کارآن‌را در کتاب فیزیك سال‌سوم دیدید این‌ویژگی‌را داردکه هرحرکت ارتعاشی‌را می‌توان درآن به‌یك ارتعاش الکتریکی دارای همان فرکانس و به‌همان شکل و با دامنه‌ای متناسب با دامنه ارتعاش اصلی تبدیل‌کرد و آن را روی صفحه فلوئورسنت نوسان نگار ظاهر ساخت.

نوسان نگارکاتدی را می‌توان به‌خوبی و با همان دقت ویژه نوسانهای الکتریکی، برای بررسی ارتعاشات صوتی به‌کار برد، کافی است که یك دهانی (یا میکروفن)[1] به‌نوسان‌نگار متصل کرد وجسم مرتعش، مثلا دیاپازن[2] را جلو آن قرار داد (شکل ۱۰-۱۹) .

ارتعاشات دیاپازن در مدار میکروفن جریان متغیری تولید می‌کند . این جریان ولتاژ متغیری‌که فرکانس آن برابرفرکانس ارتعاشات دیاپازن است بین صفحات y نوسان‌نگار برقرار



شکل ۱۰-۱۹- نوسان‌نگار کاتدی مجهز به میکروفن برای بررسی ارتعاشات دیاپازن

۱- با اساس‌کار دهانی یا میکروفن در کتاب علوم سال سوم دورهٔ راهنمایی آشنا شده‌اید.
۲- بهتر این است‌که دیاپازن الکتریکی باشد تا دامنه نوسان آن ثابت بماند .

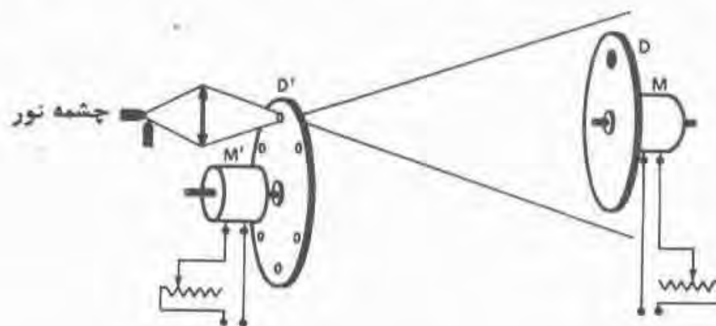
می‌سازد. اگر تواتر ولتاژهای بین صفحه‌های X و Y برابر باشد نموداری که روی صفحه نوسان نگار ظاهر می‌شود به شکل یك موج کامل است و معرف ارتعاشات سینوسی دیاپازن می‌باشد. چون فرکانس ولتاژ بین دو صفحه X روی دستگاه خوانده می‌شود فرکانس ارتعاشات منبع ارتعاش به‌آسانی معین می‌گردد.

پ - باروش استروبوسکپی - اساس این روش براین خاصیت است که برای مشاهده یك حرکت ارتعاشی سریع با پرید T یا با فرکانس $f=\frac{1}{T}$، جسم متحرك را با آذرخشهای متوالی کوتاه مدت و منظم با پرید T' و فرکانس $f'=\frac{1}{T'}$ (که در بخش ۲ ضمن شرح عکاسی استروبوسکپی به‌آن اشاره شد) روشن می‌کنند و به‌این ترتیب به‌جای حرکت واقعی جسم یك حرکت کند ظاهر می‌شود که چگونگی آن بستگی به‌اندازه‌های T و T' دارد.

شکل ۱۰-۲۰ نشان می‌دهد که چگونه می‌توان درآزمایشگاه ازپدیده استروبوسکپی برای کند نشان دادن حرکت دورانی یکنواخت یك قرص استفاده کرد:

روی قرص D که زمینه سفیدی دارد یک لکه سیاه مطابق شکل گذارده شده است و قرص توسط یك موتور الکتریکی با سرعت ثابت می‌چرخد دراین‌جا T، پرید حرکت مورد مطالعه، برابر زمان حرکت یك دور این قرص است. آذرخشهای متوالی و منظمی که باید این قرص را متناوباً روشن کنند.

با قرار دادن قرص سوراخ دار D' (که آن را قرص استروبوسکپ می‌نامیم) در مسیر پرتوهای گسیل شده از یك منبع نور تولید می‌شوند و آزمایش در اتاق تاریك انجام می‌گیرد. قرص D' روی محوریك موتورالکتریکی جداگانه‌ای نصب شده‌است که تعداد دورهای آن قابل



شکل ۱۵-۲۵ — بررسی استروبوسکپی یك حرکت تناوبی
اگر تعداد سوراخهای قرص D' برابر p و تعداد دورهای این قرص درثانیه n باشد تواتر ارتعاشات آذرخش برابر $f'=np$ خواهد بود

تنظیم است. بدیهی است قرص D وقتی روشن می‌شود که یکی ازسوراخهای قرص D' درمسیر نورقرار گیرد. بنابراین پرید T' برابرفاصله زمانی است که ضمن حرکت یکنواخت قرص D'، دو سوراخ متوالی ازجلومنبع نورمی‌گذرند. پس اگر p عده سوراخها و n عده دورهای قرص D' در واحد زمان باشد تواترآذرخشها برابر $f'=np$ خواهد بود.

اگر قرص لکه‌دار D با نور مداوم روشن شود (قرص استروبوسکپ D' ساکن باشد) وقتی که به‌سرعت می‌چرخد، چون چشم نمی‌تواند حرکت لکه سیاه را تعقیب کند این لکه روی سطح قرص به‌شکل یك‌نوار دایره‌ای شکل گسترده‌ای به‌نظرمی‌رسد. ولی اگرقرص استروبوسکپ بچرخد منظره لکه سیاه کاملا متفاوت می‌شود و برحسب مقادیر T و T' حالات زیر را می‌توان مشاهده کرد :

۱- اگر $T'=kT$ باشد (یا $f'=\frac{f}{k}$ ، k عدد درستی است) لکه در فاصله میان دوبار روشن شدن متوالی ، درست k دور می‌چرخد و چون هر بار که قرص D روشن می‌شود لکه درست به‌وضعیت پیشین خود می‌رسد بنابراین ساکن به‌نظرمی‌رسد درحالتی که $k=1$ باشدداریم $T=T'$ و $f=f'$.

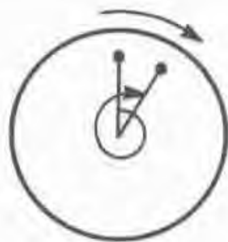
۲- اگر $T'=\frac{T}{k}$ (یا $f'=kf$) بـاشد قرص لکه دار بین دو آذرخش متوالی ، $\frac{1}{k}$ دور می‌چرخد و بنابراین k لکه ساکن روی آن به نظر می‌رسد.

۳- اگـر مقدار T' (پرید آذرخشها) خیلی نزدیك به T (پرید حـرکت لکه) باشد چنین به‌نظرمی‌رسد که لکه به‌کندی با یك حـرکت یکنواخت درجهت حرکت واقعی خود و یا در خلاف جهت آن ، برحسب این که T' بزرگتر یا کوچکتر از T باشد حرکت می‌کند اگر تواتر ظاهری حرکت لکه را به ν (حرف لاتینی باتلفظ نو) نمایش دهیم درحالتی که $T'>T$ (یعنی $f'<f$) است رابطهٔ زیر برقرار است[1] :

$$\nu=f-f' \qquad (۱۸-۱۵)$$

۱- برای اثبات این رابطه می‌گوئیم که بین دوبار روشن شدن متوالی (یعنی در زمان T')، لکه در واقع یك دور بعلاوه کسر کوچکی از یکدور ($\frac{1}{n}$ دور) می‌چرخد ولی به نظر می‌رسد که فقط $\frac{1}{n}$ دور چرخیده است (شکل ۱۵-۲۱). بنابراین به‌ظاهر یك دور را درمدتی که n برابر T' است می‌چرخد که زمان تناوب ظاهری حرکت لکه است و آن را به T_a نمایش می‌دهیم:

$$T_a=nT'$$



شکل ۱۵-۲۱- در مدت T' لکه در واقع $1+\frac{1}{n}$ دور چرخیده است

←

برای تعیین تواتر یك دیاپازن به روش استروبوسکپی، به هرشاخه یك دیاپازن الکتریکی ورقه نازك فلزی‌که شکاف باریکی تقریباً در وسط دارد نصب می‌کنند به‌طوری‌که وقتی دیاپازن بی‌حرکت است شکافها مقابل‌هم باشند (شکل ۱۰-۲۲) ونور بتواند ازآنها بگذرد، ولی موقعی که دیاپازن مرتعش می‌شود ورقه‌ها نیزمرتعش می‌گردند و هرورقه شکاف دیگری را می‌پوشاند ونور نمی‌تواند ازمجموعه آنها بگذرد مگر هنگامی‌که شاخه‌ها از وضع تعادل خودمی‌گذرند. بدیهی است این وضعیت درهر ارتعاش‌کامل دوبار اتفاق می‌افتد. یك قرص‌که روی آن چند لکه سیاه به فاصله‌های مساوی گذارده شده است در عقب دیاپازن روی محور افقی موتوری نصب است واز میان شکافها نظاره می‌شود. وقتی‌که دیاپازن در حال ارتعاش است قرص را به‌حرکت درمی‌آورند وتعداد دورهای موتور را طوری‌تنظیم می‌کنند که‌لکه‌های روی قرص ازمیان شکافها بی‌حرکت به‌نظربرسند. در این حالت زمان نیم نوسان کامل‌دیاپازن برابر زمانی است که قرص به اندازه فاصله دولکه متوالی می‌چرخد.

اگر در این حالت n تعداد دورهای قرص در ثانیه و p عده لکه‌های سیاه روی آن و T



شکل ۱۰-۲۳

← ولی در واقع در زمان T_a، لکه به‌اندازهٔ $n\left(1+\frac{1}{n}\right)=n+1$ دور چرخیده است.

در نتیجه :

$$T_a = nT' = (n+1)T$$

و از آنجا:

$$n = \frac{T_a}{T'} = \frac{T_a}{T} - 1 ،$$

یا :

$$\frac{1}{T_a} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T'}$$

و یا:

$$\boxed{\nu = f - f'}$$

پرید دیاپازن باشد، چون قرص در هر نصف پرید دیاپازن (یعنی در مدت $\frac{T}{۲}$) به‌اندازه $\frac{۱}{p}$ دور می‌چرخد، پس در مدت یك ثانیه به‌اندازه $\frac{۲}{pT}$ دور خواهد چرخید بنابراین:

$$T=\frac{۲}{np} \quad و \quad n=\frac{۲}{pT}$$

تواتر دیاپازن برابر خواهد بود با:

$$f=\frac{۱}{T}=\frac{np}{۲}$$

۱۰-۸) - زیرا چنانکه محاسبه نشان می‌دهد این معادله برای حرکت نوسانی بر روی خط راست نوشته شده است. موقعی‌که دامنه نوسان آونگ‌کوچك باشد می‌توان‌حرکت گرانیگاه آن را روی خط راست درنظرگرفت ولی وقتی‌که زاویه نوسان آونگ بزرگ باشدگرانیگاه آن دیگر روی خط راست حرکت نمی‌کند و این رابطه برای توجیه حرکت‌آونگ‌کافی نیست و باید معادله‌کاملتری را به‌کار برد.

۱۰-۹) - زیرا حرکت آونگ، وقتی‌که اصطکاك درکار نباشد نظیر حرکت جسم برروی سطح شیب دار بدون اصطکاك و یا حرکت سقوط آزاد است‌که شتاب‌آن بستگی به جرم ندارد.

۱۰-۱۰)- امواج پلاریزه در طول یك طناب مستقیماً با چشم به خوبی تشخیص داده نمی‌شوند. بهتر این است که طناب را از یك شکاف عبور دهیم . اگر شکاف در سطح موج واقع باشد، موج ازآن می‌گذرد.

۱۰-۱۱)- برای نقاط همفاز داریم $۲\pi\frac{x}{\lambda}=۲k\pi$ (زیرا $\sin\omega t=\sin(\omega t\pm۲k\pi)$)

در نتیجه :

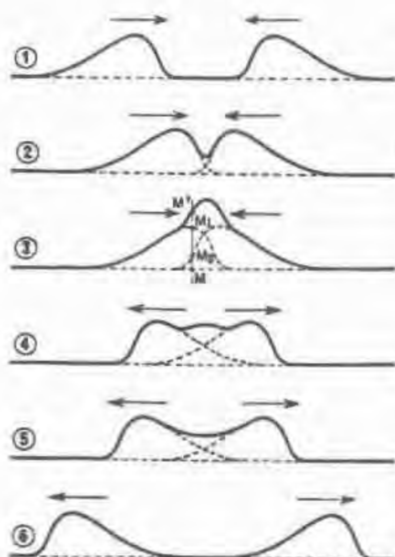
$$x=k\lambda$$

۱۱

ترکیب حرکات ارتعاشی ـ تداخل امواج

در بخش پیش، بیشتر درباره انتشار امـواجی که از یك منبع ارتعاش تولید می‌شوند گفتگوکردیم و به جز حالت تشکیل امواج ایستاده،بحثی از تلاقی امواج و تداخل آنها در یك دیگر به میـان نیاوردیم. درعمل اغلب با موجهایی سر و کار داریم که از برخورد یا تلاقی موجهای مختلف به‌وجود می‌آیند مثلاً وقتی‌که قطره‌های باران‌برسطح‌آب‌آرام یك استخرفرومی‌چکند موجهای دایره‌ای شکلی پدیدمی‌آورند که برسطح‌آب انتشارمی‌یابند. این امواج با یك دیگر تلاقی می‌کنند و منظره بدیعی را به‌وجود مـی‌آورند؛ یا موقعی که امواج صوتی ازچند منبع مولد صوت به‌وجود می‌آیند و واردگوش می‌شوند آن چه‌که شنیده می‌شود یك صوت مرکب است‌که اثر آن برگوش به‌عاملهای زیادی بستگی دارد. دراین‌بخش این گونه پدیده‌ها را بررسی خواهیم کرد.

تلاقی دو موج ـ اصـل ترکیـب حـرکات ارتعاشی کم دامنهـ در نظـر بگیـریم کـه دو آشفتگی در یك طناب کشـان از دو سوی مخالف به یـك دیگـر نزدیك مـی‌شوند (شکـل ۱۱-۱). آزمایش نشان می‌دهدکه ایـن دو آشفتگـی پس از تلاقی، از یك دیگر عبور می‌کنند وبدون آن‌که در شکل آنها تغییر حاصل شود حـرکت خـود را در



شکل ۱۱-۱ـ ترکیب دو آشفتگی که در سوی مخالف هم در یك طناب حرکت می‌کنند آشفتگیها پس از تلاقی، بدون تغییر شکل به حرکت خود ادامه می‌دهند



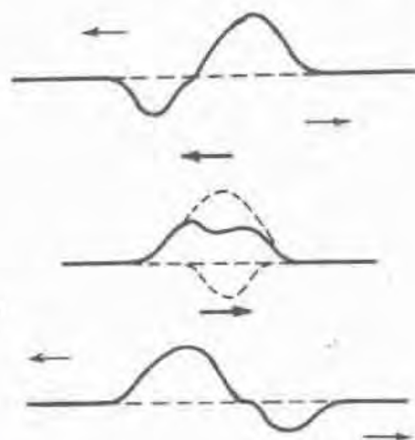
شکل ۱۱-۲- تداخل امواج دایره‌ای که برسطح آب کشیده می‌شوند

همان جهت نخستین ادامه می‌دهند. این پدیده یعنی عبور بدون تغییرشکل امواج از یك دیگر، در هر نوع موجی مشاهده می‌شود، مثلاً به‌آسانی می‌توان نمونه آن را درامواج برسطح آب مشاهده کرد (شکل ۱۱-۲).

در لحظه‌ای که دو موج یك‌دیگر را تلاقی می‌کنند. در محل تلاقی آنها بعد یا تغییر مکان هر ذره ازمحیط نسبت به‌وضع تعادل خود برابر برآیند تغییر مکانهایی است که آن ذره در اثر عبور هر موج جداگانه‌دارا خواهد شد. این خاصیت را «اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه» گویند. چون در طناب، یا در سطح آب، راستای تغییر مکانها بر امتداد انتشار موجها عمود است، این تغییر مکانها هم راستا هستند و به‌طور جبری باهم جمع می‌شوند مثلاً به طوری که در شکل (۱۱-۱-۳) مشاهده می‌شود اگر MM_1 تغییر مکان ذره M از وضع تعادل خود در موقع عبور یك موج و MM_2 تغییر مکان همین ذره در موقع عبور موج دیگر باشد وقتی که این دو موج با هم به‌نقطه M می‌رسند تغییر مکان MM' این ذره برابر مجموع دو تغییر مکان جداگانه خواهد بود

یعنی
$$\overline{MM'}=\overline{MM_1}+\overline{MM_2}$$

نمونه دیگری از اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه در شکل ۱۱-۳ نشان داده شده است. دراین جا تغییر مکانهای ذرات محیط در خلاف جهت یك دیگرند بنابراین‌وقتی‌که دوموج دریك نقطه‌ازمحیط به‌هم می‌رسند اثریك دیگر را خنثی می‌کنند و بعد حرکت آن نقطه برابر تفاضل دو بعدی است که هر موج جداگانه به آن نقطه می‌دهد شکل (۱۱-۴ الف و ب) که به‌وسیله عکاسی استروبوسکپی گرفته شده است نزدیك شدن و تلاقی و سپس دور شدن دو آشفتگی هم جهت و در خلاف جهت هم را در طول یك طناب و یك فنر نشان می‌دهد.



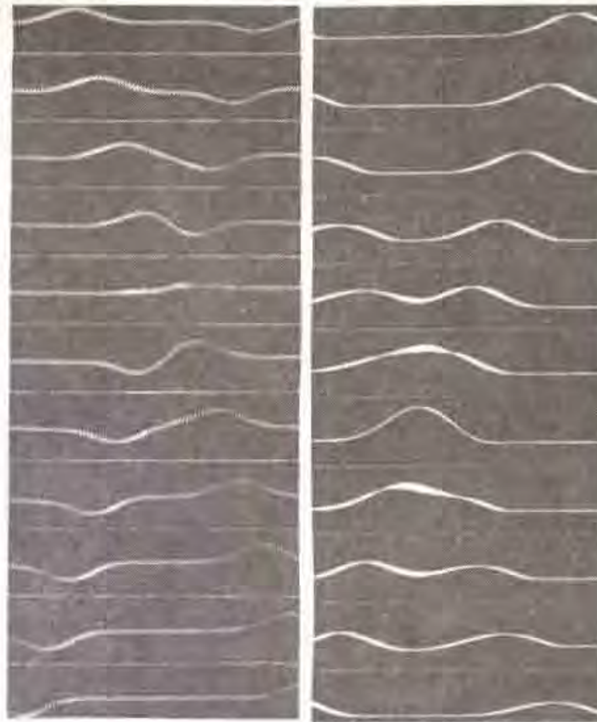
شکل ۱۱-۳- تلاقی دو آشفتگی که نسبت بهم در فاز متقابل هستند

هم تلاقی می‌کنند.

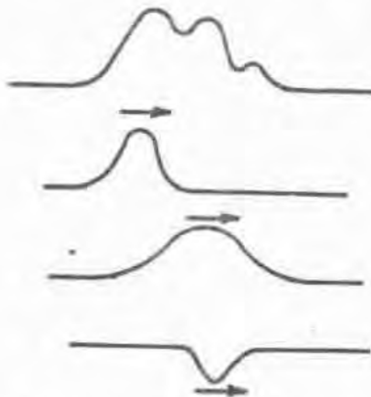
پرسش ۱۱-۱- در چه صورت برای تعیین بعد حرکت منتجه از جمع برداری استفاده می‌شود؟

اصل ترکیب حرکات ارتعاشی به ما امکان می‌دهد که یك موج مرکب را به‌اجزاء اصلی آن که موجهای ساده‌ای هستند تجزیه کنیم مثلاً در شکل ۱۱-۵ یك تك موج مرکب به‌سه تك موج ساده تجزیه شده است.

در سال ۱۸۰۷ میلادی، فوریه [۱] ریاضی‌دان فرانسوی قضیه مفیدی را اثبات کرد که به‌موجب آن هرحرکت تناوبی مرکب را هرچند هم که‌پیچیده باشد می‌توان به مجموعه‌ای از حرکات سینوسی ساده تجزیه‌کرد. این قضیه را باآزمایش نیزمی‌توان تحقیق‌کرد. مثلاً اصوات مرکب حاصل ازاسباب‌های موسیقی را چنان که خواهیم دید می‌توان



شکل ۱۱-۴- ترکیب دوآشفتگی که بوسیله عکاسی استروبوسکپی تهیه شده است.
الف- دو آشفتگی هم جهت در طول یك طناب
ب- دو آشفتگی در خلاف جهت هم در طول یك فنر



شکل ۱۱-۵- تجزیه یك موج مرکب به امواج ساده‌ای که اجزاء اصلی آن را تشکیل می‌دهند.

اصل ترکیب حرکات ارتعاشی در مورد تلاقی چند موج نیزصادق است: هر موج، جداگانه تغییر مکانی به‌یك نقطه ازمحیط می‌دهد وتغییر مکان‌کل در محل تلاقی این موجها برابر مجموع جبری یا برداری تغییر مکانهای حاصل از امواجی است که‌با

۱- Baron Joseph Fourier (۱۷۶۸-۱۸۳۰م) - قضیه فوریه به صورت زیر نوشته می‌شود و اثبات آن از حدود برنامه این‌کتاب خارج است.

$$y = a_0 + a_1 \sin(2\pi \times ft + \theta_1) + a_2 \sin(2\pi \times 2ft + \theta_2) + a_3 \sin(2\pi \times 3ft + \theta_3) + \dots$$

به صوتهای ساده‌ای مانند صوت حاصل از یك دیاپازن تجزیه کرد و یا به‌وسیله دستگاههای نوسان‌ساز الکترونیکی صوتهای ساده‌ای با تواترهای مناسب ایجاد کرد و از ترکیب آنها صوتهای مرکب موسیقی را پدید آورد.

ترکیب دو حرکت ارتعاشی سینوسی

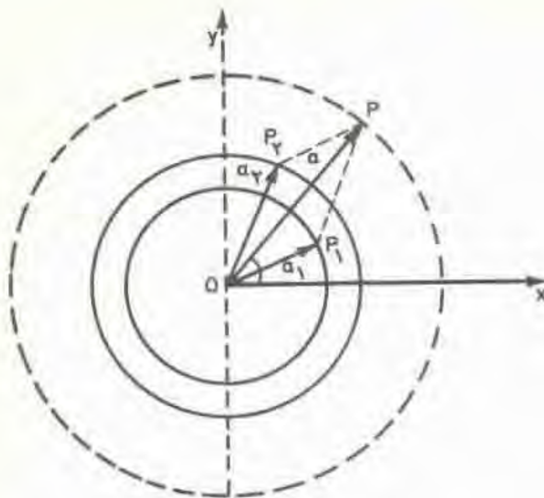
درنظر بگیریم که نقطه M دریك محیط کشسان، در آن واحد تحت اثر دو حرکت ارتعاشی سینوسی هم پرید و هم راستای کم دامنه قرار گیرد. فرض می‌کنیم $y_1 = a_1 \sin(\omega t + \theta_1)$ بعد حرکت نقطه M درلحظه t در اثر یکی از این دو حرکت ارتعاشی و $y_2 = a_2 \sin(\omega t + \theta_2)$ بعد حرکت این نقطه در همین لحظه دراثر حرکت ارتعاشی دومی به‌تنهایی باشد. چون راستای هردو حرکت ارتعاشی بنا به‌فرض یکی است، بنا به‌اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه، بعد حرکت نقطه M در لحظه t مجموع جبری دو بعد y_1 و y_2 خواهد بود یعنی:

$$y = y_1 + y_2 =$$
$$a_1 \sin(\omega t + \theta_1) + a_2 \sin(\omega t + \theta_2)$$

a_1 و a_2 دامنه‌های دو حرکت ارتعاشی و θ_1 و θ_2 فازهای اولیه آنها در مبدأ زمان $t_0 = 0$ هستند. نتیجه این دو حرکت ارتعاشی، حرکت ارتعاشی دیگری است در همان راستا و با همان پرید که اگر دامنه آن را به a و فاز اولیه‌اش را به θ نمایش دهیم معادله آن به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$y = a \sin(\omega t + \theta) \qquad (۱-۱۱)$$

برای تعیین مقادیر a و θ در نظر بگیریم که دو نقطه P_1 و P_2 روی دو دایره مرجع به‌شعاعهای



شکل ۱۱-۶- نمودار ترکیب دو دامنه به روش برداری

$r_1 = a_1$ و $r_2 = a_2$ با سرعت زاویه‌ای ثابت ω حرکت می‌کنند و در مبدأ زمان $t_0 = 0$ شعاعهای $\overrightarrow{OP_1}$ و $\overrightarrow{OP_2}$ با محور Ox زاویه‌های θ_1 و θ_2 را می‌سازند (شکل ۱۱-۶). تصویرهای این دوشعاع بر روی محور Oy، در هر لحظه نمایش بعدهای y_1 و y_2 هستند.

بردار $\overrightarrow{OP}$ که برآیند دو بردار $\overrightarrow{OP_1}$ و $\overrightarrow{OP_2}$ است نیز با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد زیرا متوازی‌الاضلاع OP_1PP_2 بدون این که تغییر شکل بدهد می‌چرخد. تصویر بردار $\overrightarrow{OP}$ روی محور Oy در هر لحظه t همان تابع $y = a \sin(\omega t + \theta)$ است، زیرا طبق قضیه تصویرها، $y = y_1 + y_2$ است و θ زاویه‌ای است که بردار $\overrightarrow{OP}$ در لحظهٔ $t_0 = 0$ با محور Ox می‌سازد. اختلاف فاز بین دو حرکت ارتعاشی y_1 و y_2 برابر است با

$$\varphi = (\omega t + \theta_2) - (\omega t + \theta_1)$$

یا

$$\varphi = \theta_2 - \theta_1 \qquad (۲-۱۱)$$

(φ حرف لاتینی تلفظ فی است) و a (یعنی دامنه حرکت برآیند)، بنابرآن چه در جمع بردارها در بخش ۴ بیان شد ازرابطه زیر حساب می‌شود.

$$a^2=a_1^2+a_2^2+2a_1a_2\cos\varphi \qquad (۱۱-۳)$$

در حالت ویژه‌ای که $a_1=a_2$ است داریم

$$a^2=2a_1^2(1+\cos\varphi)$$

و چون $1+\cos\varphi=2\cos^2\frac{\varphi}{2}$ است[1] بنابراین

$$a^2=4a_1^2\cos^2\frac{\varphi}{2} \qquad (۱۱-۴)$$

و یا

$$a=2a_1\cos\frac{\varphi}{2} \qquad (۱۱-۵)$$

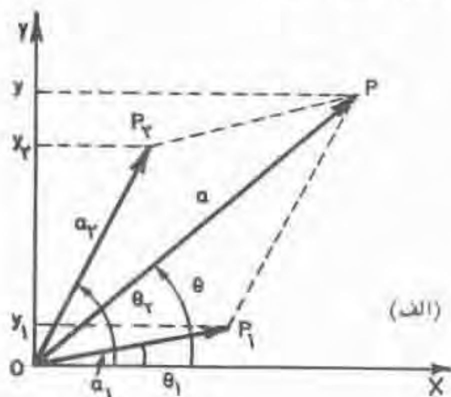
پرسش ۱۱-۲- آیا اختلاف فاز φ با فاز اولیه θ یکی است.

پرسش ۱۱-۳- در چه صورت دامنه ارتعاش منتجه، بیشترین مقدار خودرا دارد ودر چه‌صورت صفر است؟

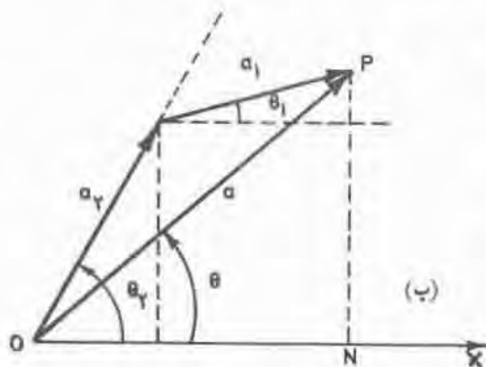
استفاده از روش ترسیم برای تعیین دامنه - شکل ۱۱-۶ نشان می‌دهد که دامنه a برابر قطر متوازی‌الاضلاعی است که اندازه‌های دو ضلع آن برابر دامنه‌های a_1 و a_2 است. وفاز اولیه θ برابر زاویه‌ای‌است‌که این قطر در لحظهٔ $t_0=0$ بامحور OX می‌سازد بنابراین برای تعیین a و θ به روش ترسیم کافی‌است دو بردار $\overrightarrow{OP_1}$ و $\overrightarrow{OP_2}$ را به‌ترتیب به اندازه طولهای a_1 و a_2 با انتخاب یك واحد مناسب طوری رسم کنیم‌که با محور OX به‌ترتیب زاویه‌های θ_1 و θ_2 را بسازند (شکل ۱۱-۷-الف) سپس روی این بردارها متوازی‌الاضلاع را بناکنیم و قطرآن را با همان واحد بسنجیم وزاویه این‌قطر را با محور Ox اندازه بگیریم و به این ترتیب a و θ را معین نمائیم.

شکل (۱۱-۷-ب) طرح ساده‌تری را که‌«رسم فرنل[2]» نامیده می‌شود برای این منظور نشان می‌دهد.

پرسش ۱۱-۴ - با استفاده از رسم فرنل فاز اولیه θ را حساب کنید.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱-۷- رسم فرنل برای تعیین دامنه a و فاز اولیه θ

۱- رابطهٔ مثلثاتی که آن را در مثلثات دیده‌اید

۲- Fresnel

تداخل امواج

اگـر دو منبع تولید ارتعاشات سینوسی هم‌پرید و هم دامنه، دریك محیط به‌طور منظم با هم بـه ارتعاش درآیند امواج حاصل از ارتعاش منظم آنها ضمن انتشار در محیط درهم داخـل می‌شوند و در هرنقطه از محیط، بعدهـای حرکت بنا بـه‌اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کـم دامنه با هم ترکیب شده موجهای ایستاده ویژه‌ای‌را به‌وجود می‌آورند ر این حالت می‌گوئیم پدیدهٔ «تداخل» حاصل‌شده

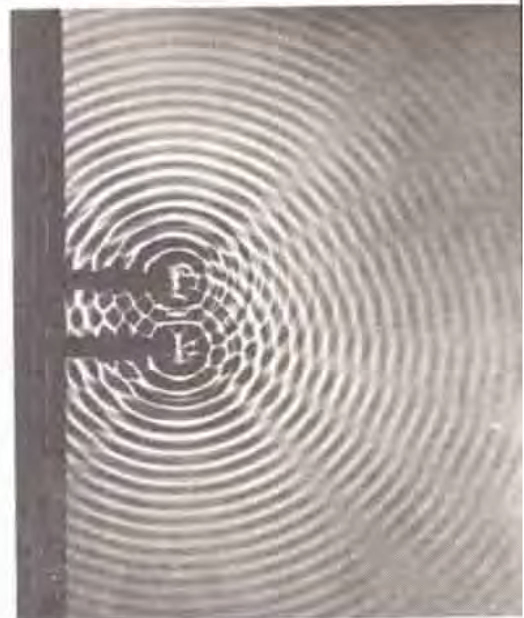


شکل ۱۱-۹- موج نما

شکل ۱۱-۸ منظره تداخل امواج حاصل از دو منبع ارتعاش هم‌فاز و هم پرید را بـر سطح آب آرام درون ظرف «موج‌نما» نشان می‌دهد.

موج‌نما یك وسیله‌آزمایشگاهی است که‌برای بررسی رفتار موجها بـه کار می‌رود و ظرف قاب‌مانندی است که کف آن یك‌صفحه شیشه است‌وروی چهارپایه قرار داده می‌شود (شکل ۱۱-۹).

دراین ظرف تا ارتفاع یك یا دو سانتیمتر آب ریخته مـی‌شود. منبع ایجاد موج معمولاً در وسط یکی ازکناره‌های ظرف قـرار دارد[1]. بـا یك چراغ



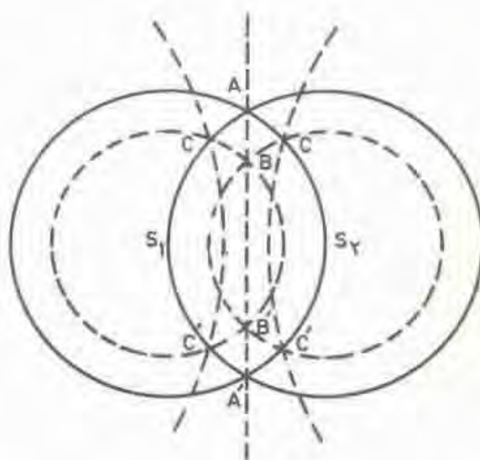
کل ۱۱-۸- منظره تداخل امـواج عـرضی حاصل از دو منبـع تعاش هم‌پرید و هم‌دامنه برسطح آب‌آرام درون ظرف موج‌نما.

۱- منبع ایجاد موج معمولا یك تیغهٔ فنری است کـه‌بـه‌وسیله یك دستگاه الکتریکـی (مـانند دیاپازن کتریکی) بـه ارتعاش در می‌آیـد به سرآزاد این تیغه یك میله افقی عمود بر راستای تیغه و موازی با سطح ب درون موج‌نما متصل است و روی ایـن میله دو میله دیگـر مخروطی شکل و کوتـاه در فـاصله مناسب طور قائم قرار دارد که با سطح آب تماس دارند و هنگامی که تیغه مرتعش می‌شود در سطح آب آشفتگی جاد می‌کنند و ایـن آشفتگیها بـه صورت امواج دایره‌ای شکل برسطح آب منتشر می‌شوند.

روشن که بالای سطح آب نصب می‌شود می‌توان تصویر پدیده را روی پردهٔ سفیدی کـه زیر ظـرف روی زمین گسترده می‌شود انداخت علاوه بر این می‌توان با روش استروبوسکپی منظره تـداخل را روی پرده به‌ظاهر ساکن نمود و بهتر مشاهده کرد.

برای توجیه پدیده تداخل که درشکل ۱۱-۸ مشاهده می‌شود فرض می‌کنیم دو منبع باهم شروع به‌ارتعاش کنند. حرکت حاصل از یك ارتعاش کامل هریك از دو منبع به شکل یك موج کامل دایره‌ای شکل که شامل یك برجستگی ویك فرورفتگی است برسطح آب منتشر می‌شود.

در شکل ۱۱-۱۰ حالتی را نشان داده‌ایم که دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 فقط یك نـوسان کامل انجام داده‌اند و امواج حاصل از آنها در یك دیگر تداخل کرده‌اند. در این شکل برجستگی هـر موج بـه‌صورت دایره توپر و فرورفتگی آن بـه صورت دایره خط‌چین نمایش داده شده است.



شکل ۱۱-۱۰- تداخل دو موج

در نقاط A و A' و همچنین در نقاط B و B' دامنه ارتعاش ماکزیمم است ولی در نقاط C و C' دامنه ارتعاش صفر است.

A و A' نقاطی هستند که برجستگیهای دو موج درآن جا با یکدیگر تلاقی کـرده‌اند. در این نقاط دوموج هم‌فازند و دامنه‌های آنها به‌هم اضافه می‌شود یعنی در این نقاط دامنه ارتعاش ملکولهای آب بیشترین مقدار خود را دارد. در نقاط B و B' که دو فرورفتگی به هم رسیده‌اند عمق فرو رفتگی در سطح آب نیز بیشترین مقدار است. در این نقاط هم دو موج هم فـاز هستند و دامنه ارتعاش آنها به‌هم اضافه می‌شود، ولی‌در نقاطی مانند C و C'، دو موج در فاز متقابـل به هم می‌رسند، در نتیجه تغییرمکان ذرات محیط در این نقاط در جهت‌مخالف است بنابراین اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند و چون دامنه دو ارتعاش یکـی است این نقاط بی‌حـرکت می‌مانند.

نقاط A و A' و B و B' که بیشترین دامنه حرکت را دارند روی عمودمنصف S_1S_2 واقعند و فـاصله‌هـای این نقاط از دو منبع S_1 و S_2 یکی است. نقاط ساکن C و C' روی منحنی‌هایی به‌شکل هذلولی قرار دارند وتفاضل فاصله‌های آنها ازمنبع S_1 و S_2 برابرنصف طول موج$\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ است.

اینك درنظربگیریم که دو منبع ارتعاشS_1وS_2 همزمان شروع به ارتعاش کنند و ارتعاش آنها به طور منظم ادامه یابد. امواجی که در اثر ارتعاش این دو منبع بـر سطح آب پخش می‌شونـد در تمام نقاط سطح آب تداخل می‌کنند. اگـر مانند حالت پیش مکانهایی را که دارای ماکزیمم ارتعاش و هم حالت هستند جداگانه به‌هم وصل کنیم و نقاطی را هم که ساکن می‌مانند نیزجداگانه به‌هم وصل‌نمائیم شکل ۱۱-۱۱ به‌دست‌می‌آیدکه به‌کمك‌آن می‌توان منظره واقعی تداخل را کـه در شکل ۱۱-۸ دیـده

مکان هندسی نقاطی هستند کـه دامنه ارتعاش آنها صفر است بنابراین امواجی که به‌این نقاط می‌رسند نسبت به‌هم در فاز متقابلند و این در صورتی است که اختلاف فاصله‌های این نقاط از دو منبع S_1وS_2 برابر مضرب فردی از نصف طول موج باشد یعنی:

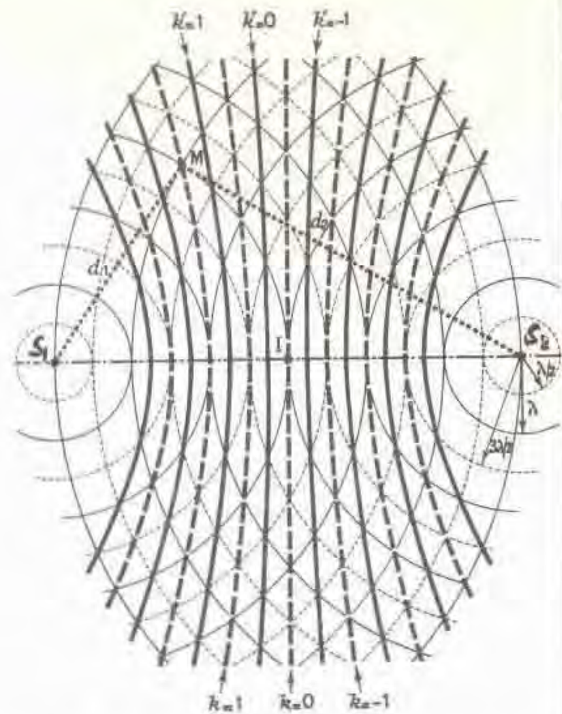
$$d_2 - d_1 = (k + \frac{1}{2})\lambda = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (7-11)$$

بنابراین در محیطی که تداخل امواج صورت می‌گیرد ارتعاش هرنقطه از آن محیط، با ارتعاشات دو منبع هم‌راستا و هم‌پرید است ولی دامنه و فاز آن بستگی به‌وضعیت آن نقطه نسبت به‌دومنبع ارتعاش دارد و دامنه حرکت منتجه تـابع $d_2 - d_1$ (یعنی اختلاف فاصله‌های آن نقطه از دو منبع ارتعاش) است. باید درنظرداشت امواج هذلولی شکل‌تداخلی ازنوع موجهای ایستاده‌هستند وحرکت انتقالی ندارند.

پرسش ۱۱-۵ - چگونه می‌توانید بنابراصل ترکیب حرکات ارتعاشی‌کم دامنه با توجه به‌رابطه ۱۱-۴ همین نتایج را به‌دست آورید؟

تداخل امواج یك پدیده عمومی است‌که در بسیاری ازموارد مشاهده می‌شود. به‌طورکلی‌هرجا کـه دو منبع ارتعاشی همزمـان و هم‌پرید وجود داشته باشد پدیده تداخل صورت می‌گیرد.

در پاره‌ای از موارد، مانند تـداخل امواج در سطح‌آب یا در طول‌یك طناب (تشکیل‌موجهای ایستاده که در بخش ۱۰ بـه آنها اشاره شد) این پدیده مستقیماً با چشم دیده می‌شود. تداخل‌امواج صوتی را می‌توان با قراردادن دو بلندگوی‌کوچك (که هردو وصل به‌یك منبع تولید صوت باشند) در فاصله‌مناسب ازیکدیگر، باگوش‌یا با یك میکروفن که وصل بدستگاه نوسان نگار است تشخیص داد:



شکل ۱۱-۱۱- طرح ساده‌ای ازمنظره تداخل امواج بر سطح مایع: هذلولیهای خط نمایش مکان نقاطی هستند که ماکزیمم ارتعاش را دارند و هذلولیهای توپر نمایش مکان نقاط ساکن هستند

می‌شود توجیه کرد. در شکل ۱۱-۱۱، هذلولیهای خط چین نمایش مکان هندسی نقاطی هستندکه دامنه ارتعاش آنها ماکزیمم است. امواجی‌که از دومنبع S_1 و S_2 به این نقاط می‌رسند هم فاز هستند و این درصورتی است‌که یافاصله‌های این نقاط از دو منبع ارتعاش مساوی باشند (نقاط واقع برعمود منصف S_1S_2)و یا این‌که‌تفاضل فاصله‌های آنها از دو منبع ارتعاش برابر مضرب درستی از طول موج λ باشد یعنی:

$$d_2 - d_1 = k\lambda \qquad (6-11)$$

هذلولیهایی‌که باخط توپر نمایش‌داده شده‌اند

در نقاطی‌که دامنه‌های امواج صوتی حاصل از دو بلندگو به‌هم اضافه می‌شوند صدا کاملاً قوی‌است ولی در نقاطی‌که امواج صوتی حاصل از بلندگوها اثر یکدیگر را خنثی مـی‌کنند دامنه ارتعاش صفر است و صدا شنیده نمی‌شود پدیده تداخل در نور و امواج الکترومانیتیك نیز صورت مـی‌گیرد و در جای خود بیان خواهد شد.

محاسبه طول موج ـ خـاصیت تـقـارنـی کـه در پدیده تـداخل وجود دارد سبب می‌شود کـه با اندازه‌گیری فاصله دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 از یکدیگر و با تعیین مکان نقاطی که ماکزیمم‌ارتعاش را دارند و یا ساکن هستند، بتوانیم طول موج‌هر- نوع از امواج را با استفاده ازپدیده تداخل‌حساب کنیم . (S_1 و S_2 ممکن است دو منبع ارتعـاش مکانیکی یا صوتی هم‌فاز وهم پرید باشند و یا دو شکاف باشند که در مقابل یك منبع ارتعاش قـرار داده شده‌اند). فرض می‌کنیم :

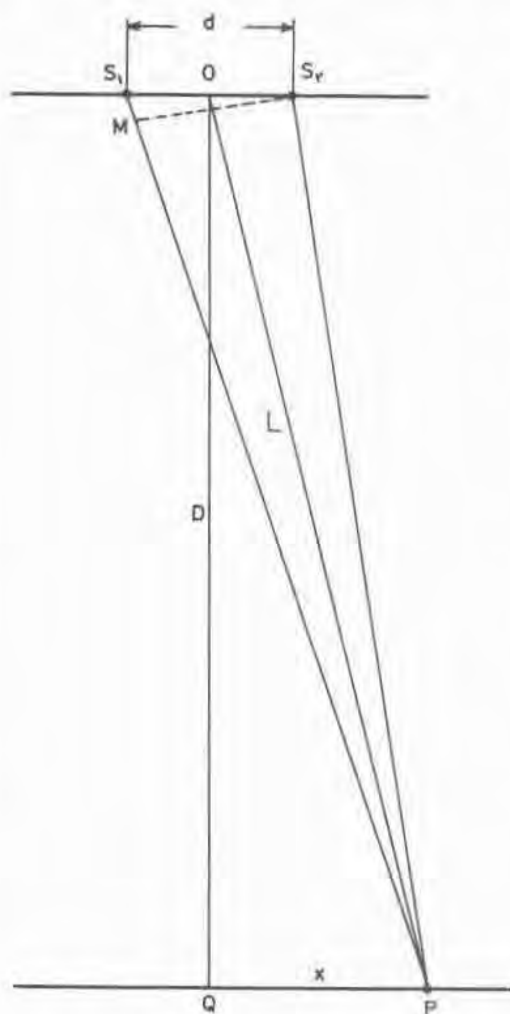
$d = S_1S_2$ فاصله میان دو منبع ارتعاش S_1وS_2،

$D = OQ$ فاصله یك خط یا یك صفحه نسبتاًدور و موازی با S_1S_2 از دو منبع ارتعاش

$x = QP$فاصلهٔیك‌نقطه P واقع درروی‌خط یاصفحه نام برده از محور مرکزی OQ

و $L = OP$ فاصله نقطه P تا O وسط S_1S_2باشد (شکل ۱۱-۱۲).

موجهایی‌که از منبع S_1 به‌نقطه P می‌رسند نسبت به امواجی کـه از منبع S_2 بـه این نقطه می‌رسند راه بیشتری را می‌پیمایند. اگر این اختلاف راه برابر λ، 2λ و .... یـا $k\lambda$ باشد این امواج در نقطه P هـم‌فـاز هستند ، در نتیجه دامنه‌هـای ارتعاش آنها به‌هم افزوده‌می‌شود و دامنه و شدت[1] موج درنقطهP ماکزیمم‌است. ولی اگر اختلاف راه $S_1P - S_2P$ برابر $\frac{\lambda}{2}$ یا $3\frac{\lambda}{2}$ و ... ویا بطورکلی $(2K+1)\frac{\lambda}{2}$ باشد امواجی که از دو منبع به‌این



شکل ۱۱-۱۲- محاسبه طول موج λ

۱ـ شدت موج چنان کـه در بخش ۱۰ دیدیم متناسب‌با مجذور دامنه است.

نقطه مـی‌رسند در فـاز متقابـل هستند، در نتیجه دامنه و شدت موج در این نقطه صفر است.

برای محاسبه λ ، قوس MS_2 را به مـرکز P و بـه‌شعاع PS_2 رسم می‌کنیم. در این صورت $MP=PS_2$ وطول قطعه خط MS_1 برابر اختلاف فاصله نقطه P از دو منبع S_1 و S_2 است. اگر d نسبت‌به $\frac{D}{\lambda}$ خیلی کوچك باشد (و در عمل مـی‌توان به آسانی این شرایط را ترتیب داد) قوس S_2M راکه‌قوس خیلی‌کوچکی ازیك دایره بزرگ می‌شود مـی‌توان عملاً معادل یك قطعه خط راست درنظر گرفت. زاویه S_1MS_2 نیز خیلی نزدیك بـه 90° خواهد بود به‌طوری‌که می‌توان مثلث S_1S_2Mرا قائم‌الـزاویـه دانست . علاوه بـراین دو زاویـه S_1S_2M و POQ نیز برابرنـد بنابراین دو مثلث قائم‌الزاویه S_1S_2M و POQ متشابـه هستند و خواهیم داشت :

$$\frac{S_1M}{d}=\frac{x}{L}$$

اگر فاصله D نسبت بـه x بزرگ باشد طول‌هـای D و L تقریباً برابر خـواهند بود. چنان چه دامنه یا شدت در نقطه P مـاکزیمم بـاشد $S_1M=K\lambda$ است و خواهیم داشت

$$\frac{K\lambda}{d}=\frac{x}{D}$$

و یا

$$\lambda=\frac{xd}{KD} \qquad (\text{۸-۱۱})$$

با اندازه‌گیری فواصل d و x و D، طول موج λ حساب می‌شود.

به‌ازاء $K=0$ نقطه P روی نقطه Q است وبه‌ازاء $K=1$ نقطه P اولین نقطه ماکزیمم در یکی ازدو طرف نقطه Q است و...

پرسش۱۱-۶ - اگر P، یك نقطه ساکن‌باشدت صفر باشد رابطه ۱۱-۷ به چه صورت در می‌آید؟

به این پرسش‌ها پاسخ دهید

۱)- اصل ترکیب حرکات ارتعاشی‌کم دامنه را در جمله کوتاهی بیان کنید.

۲)- دو موج تناوبی با دامنه‌هـای a_1 و a_2 با هم به یك نقطه ازمحیط‌کشسانی‌می‌رسند بیشترین تغییر مکان این نقطه چه اندازه می‌تواند باشد؟

۳)- موجی مطابق شکل (۱۱-۱۳) ازچپ‌به راست در طول طنابی منتشر می‌شود.شکل موجی را نشان دهید که‌اگر از راست به چـپ در طول این طناب منتشر شود اثر این موج را کاملاً خنثی کند.



شکل (۱۱-۱۳)

۴)ـ به‌کمك رسم فرنل دامنه و فازاولیه‌حرکت سینوسی حاصل ازجمع جبری سه‌حرکت سینوسی هم پرید زیر را نمایش دهید

$$y_1 = a_1 \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})$$

$$y_2 = a_2 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

$$y_3 = a_3 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$a_3 = 3Cm \text{ و } a_2 = 4Cm \text{ و } a_1 = 5Cm$$

۵)ـ امواجی که از دو منبع ارتعاشی هم‌فاز و هم پرید منتشر می‌شوند در چه صورت با فازمتقابل به‌یك نقطه می‌رسند؟

۶)ـ پدیده تداخل در چه شرایطی به وجودمی‌آید؟

۷)ـ آیا هذلولیهای ساکن و متحرکی که درپدیده تداخل امواج به‌وجود می‌آیند نظیر شکمهاو گره‌های امواج ایستاده درطول یك طناب هستند؟ توضیح دهید

۸ـ در پدیده تداخل، نقاطی‌که بیشترین‌دامنه ارتعاش را دارند درچه مکانهائی هستند؟ نقاطی که‌کمترین دامنه ارتعاش را دارند درچه مکانهائی هستند؟

۹)ـ با استدلال ریاضی نشان دهید که مکان‌نقاط ساکن یا متحرك درپدیده تداخل هذلولی هستند.

۱۰)ـ اگر دو منبع ارتعاش هم پرید که امواج حاصل از آنها تداخل می‌کنند دارای دامنه یکسان نباشند چه کیفیتی اتفاق می‌افتد؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱)ـ زمان تناوب یك حرکت‌سینوسی ۴ ثانیه ودامنه حرکت‌آن ۵ سانتیمتر وفاز اولیه آن $+\frac{\pi}{6}$ رادیان است مطلوبست

الف‌ـ بعد اولیه این حرکت و بعدآن ۶ ثانیه پس از آغاز حرکت

ب‌ـ فاز حرکت آن پس از۶ ثانیه

جواب: $2/5Cm$ و $-2/5Cm$ و $3\pi + \frac{\pi}{6}$

۲)ـ دو موج به معادله‌های:

$$y_1 = 8\sin(12\pi t + \frac{\pi}{6}) \quad \text{و} \quad y_2 = 8\sin(12\pi t + \frac{\pi}{3})$$

(که در آنها y برحسب میلیمتر است) در یك نقطه با هم تلاقی می‌کنند. معادله موج برآیند راپیدا کنید

جواب:
$$y_{mm} = 15/45\sin(12\pi t + \frac{\pi}{4})$$

۳)- دو منبع ارتعاشی هم پریدکه درفاصله ۱۰ متری یك دیگر در یك محیط کشسان قرار دارند در حال ارتعاش هستند و امـواج عـرضی در محیط منتشر مـی‌کنند. معادله‌هـای حرکت ارتعاشی این دومنبع در لحظه t به‌ترتیب عبارتند از:

$$y_2 = 0/01\sin\pi t \quad \text{و} \quad y_1 = 0/03\sin\pi t$$

(y_1 و y_2 بر حسب متـر داده شده‌اند) و امواج حاصل از آنها با سرعت $1/5\frac{m}{s}$ درمحیط منتشر می‌شوند. معادله حرکت نقطه‌ای از محیط را که روی خط واصل دو منبع در فاصله ۶ متری منبع‌اول و ۴ متری منبع دوم قرار دارد در لحظهٔ t به‌دست آورید

جواب:
$$y = 0/0264\sin(\pi t + \theta)$$
$$\text{و} \quad \theta \simeq -19^\circ$$

۴)- در یك‌آزمایش تداخل به وسیله اسباب‌موج‌نما، فرکانس دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 برابر ۶۰ هرتز و دامنه ارتعاش ۲ میلیمتر است.

الف- بعد حـرکت منتجـه را در یـك نقطه M کـه فـاصلـه آن از دو منبع S_1 و S_2 به ترتیب، $d_1 = 2/45mm$ و $d_2 = 3/7mm$ است به‌دست آورید و فاز و دامنه حرکت این نقطه را مشخص‌نمایید. سرعت حرکت امواج عرضی حاصل از دو منبع در روی سطح آب درون ظرف موج نما $36\frac{cm}{s}$ است.

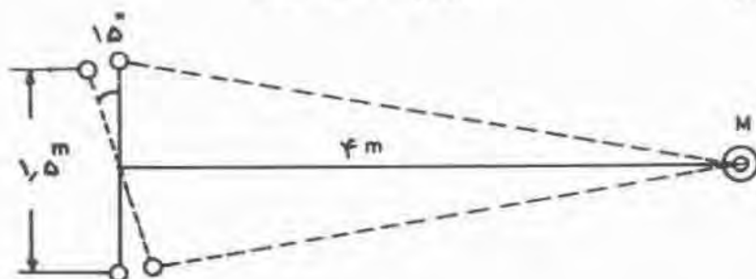
ب- مکان نقاطی را که دامنه حرکت در آنها ماکزیمم یـا صفر است مشخص‌کنید وآنها را نمایش دهید.

پ- مکان نقاطی را پیدا کنید که با دو منبع ارتعاش S_1 و S_2هم فاز هستند.

۵)- دو بلندگوی کوچك که در دو سر یك میله افقی به فاصله ۱/۵ متر از هم نصب شده‌اند هر دو به یك منبع تولید صوت متصل هستند. یك میکـروفن روی خط عمود بر وسط فاصله دوبلندگوقرار داده شده است به‌طوری‌که فاصله‌آن ازوسط‌میله (وسط فاصله دو بلندگو) ۴/۰ متر است میله حـامل بلندگوهـا راحـول محوری کـه از وسط آن‌مـی‌گذرد بـه آرامی می‌چرخانیم‌میکروفن اولین شدت ماکزیمم را وقتی دریافت می‌کند (K=1)که میله به‌اندازه

۱۵° بچرخد (شکل ۱۱-۱۴). اگر سرعت‌صوت $\frac{m}{s}$ ۳۵۰ باشد طول موج صوت پخش شده از بلندگوها و فرکانس منبع صوت را حساب کنید

جواب: ۹۱۶Hz و ۰/۳۸۲m



شکل ۱۱-۱۴

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۱

۱۱-۱)- در حالتی که راستای حرکتهای ارتعاشی یکی نباشند. ولی جمع برداری را در هرحال می‌توان به‌کار برد. بدیهی است در حالتی که‌راستای ارتعاشات یکی است جمع برداری تبدیل به‌جمع جبری می‌شود.

۱۱-۲)- نه، θ فاز اولیه حرکت ارتعاشی برآینددرلحظه $t_0 = 0$ است در صورتی‌که φ اختلاف فاز بین دو حرکت ارتعاشی y_1 و y_2 است.

۱۱-۳)- در حالتی که اختلاف فاز φ برابر صفر یا $2K\pi$ باشد، $\cos\varphi = +1$ است و دامنه‌ارتعاش برآیند، بیشترین مقدار خود را دارد یعنی $a_{max} = a_1 + a_2$ و در حالتی که اختلاف فاز φ برابر π یا مضرب فردی از π باشد $\cos\varphi = -1$ است در نتیجه $a = a_1 - a_2$ است و کمترین مقدار را دارد.

۱۱-۴)- در مثلث قائم ONP (شکل ۱۱-۷-ب) داریم:

$$tg\theta = \frac{NP}{ON}$$

$$NP = a_1 \sin\theta_1 + a_2 \sin\theta_2 \quad \text{ولی} \quad \text{و} \quad ON = a_1 \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_2$$

بنا بر این

$$tg\theta = \frac{a_1 \sin\theta_1 + a_2 \sin\theta_2}{a_1 \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_2}$$

۱۱-۵)- داریم $a=۲a_۱ \cos\frac{\varphi}{۲}$ و $\varphi=\theta_۲-\theta_۱$ به ازاء $\theta_۱=۲\pi\frac{d_۱}{\lambda}$ و $\theta_۲=۲\pi\frac{d_۲}{\lambda}$
خواهیم داشت.

$$a=۲a_۱ \cos\pi\frac{d_۲-d_۱}{\lambda}$$

دامنه a وقتی ماکزیمم است که $\pi\frac{d_۲-d_۱}{\lambda}=K\pi$ و یا $d_۲-d_۱=k\lambda$ باشد در این صورت:

$$a=\pm ۲a_۱$$

وهنگامی صفر است کـه $\pi\frac{d_۲-d_۱}{\lambda}=(۲k+۱)\frac{\pi}{۲}$ باشد یعنی

$$d_۲-d_۱=(۲k+۱)\frac{\lambda}{۲}$$

۱۱-۶)- به صورت

$$\frac{\lambda}{۲}=\frac{xd}{(۲k+۱)D}$$

۱۲

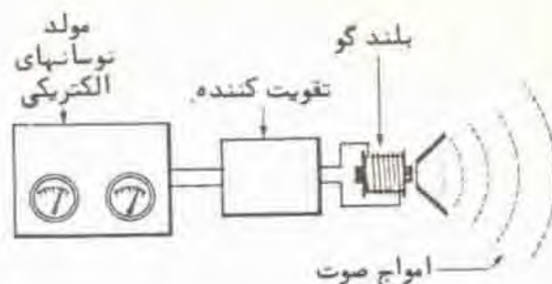
صوت

امواج صوتی از نوع موجهای مکانیکی هستند که در اثر ارتعاش اجسام کشسان تولید می‌شوند ودرگازها ومایعات وجامدات منتشر می‌گردند. وقتی امواج صوتی به‌پرده حساس گوش برخورد کنند گوش احساس شنیدن می‌کند. در دانش آکوستیك، به‌همان اندازه‌که فیزیك صوت اهمیت دارد زیست‌شناسی و حتی روانشناسی شنیدن نیزدارای اهمیت است. ولی در این جا ما صوت را به‌صورت یك حرکت ارتعاشی بررسی می‌کنیم وخواص موجی آن مانند تواتر، طول موج، سرعت انتشار، طرزتولید، طرز انتشاربازتابش وشکست را مورد مطالعه قرارمی‌دهیم واندکی هم درباره آشکار سازی صوت و اثر امواج صوتی بر گوش به‌بحث خواهیم پرداخت.

تولید و انتشار صوت

می‌دانیم صوت در اثر ارتعاش یك جسم یا مجموعه‌ای از اجسام کشسان تولید می‌شود. در بخش ۱۰ ضمن تعریف امواج ایستاده متذکر شدیم که تقریباً تمام‌صوتهای حاصل ازاسبابهای‌موسیقی در اثر تشکیل موجهای ایستاده تولید می‌گردند. منبع مولد صوت ممکن است یك جسم جامد باشد، مانند یك دیاپازن، یا یك سیم باریك که بین دو نقطه کشیده شده است، یا یك زنگ، یا یك صفحه نازك (مثلاً پوسته طبل، صفحه مرتعش بلندگو یاگوشی تلفن) و یا ممکن است جرم معینی از هوا باشد مانند صوت حاصل از ارتعاش هوای درون لوله‌های صوتی. منبع مولد صوت ممکن است مانند یك دیاپازن با ارتعاشات ساده خود صوت ساده‌ای را تولیدکند ویامانند تارهای حنجره با ارتعاشات پیچیده خود صوت مرکبی را به‌وجود آورد.

به‌کمك دستگاههای الکترونیکی نوسان ساز که امروزه در آزمایشگاهها مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان نوسانهای الکتریکی با تواتر دلخواه را (مثلاً بین ۱۰ هرتز و ۱۰۰ کیلو هرتز) تولید کرد و آنها را پس از تقویت روی یك بلندگو فرستاد، در بلندگو چنان که می‌دانید، نوسانهای الکتریکی دستگاه تبدیل به ارتعاشهای مکانیکی یك صفحه نازك مرتعش با همان تواتر می‌گردند. درشکل (۱۲-۱) طرح ساده این دستگاه



شکل ۱۲-۱- طرح ساده‌ای از یك دستگاه نوساز سازالکترونیکی.

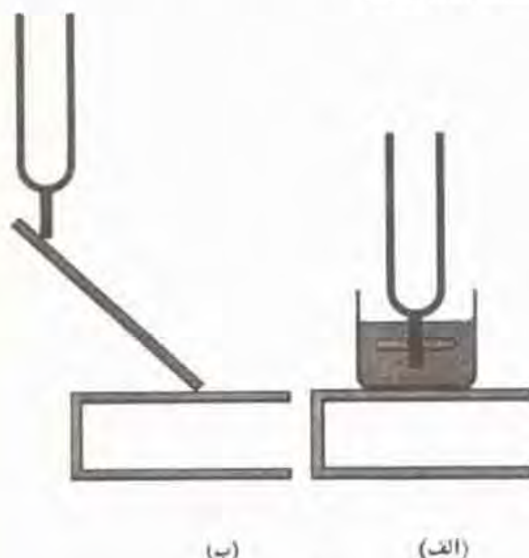
نشان داده شده است. ولی گوش انسان صوتهایی را می‌شنود که‌تواتر آنها چنان که می‌دانید به‌طور متوسط بین ۲۰ هرتز و ۲۰٬۰۰۰ هرتز باشد[1]. تواترهای بیش از ۲۰٬۰۰۰ هرتز را ماوراء صوت می‌نامند صوتی‌که از یك منبع مولد صوت تولید می‌شود آناً به‌گوش نمی‌رسد بلکه با سرعتی که از سرعت نور به مراتب کوچکتر است در هوا منتشر می‌گردد. انتشار صوت در واقع، انتشار حرکت ارتعاشی منبع مولد صوت است. ازاین منبع‌امواجی منتشر می‌شوند که ویژگیهای آنها نظیر همان موجهایی‌است‌که دربخش پیش‌آنها را بررسی‌کردیم. این امواج حامل انرژی مکانیکی‌به‌نام انرژی صوتی هستند که بخشی از انرژی مکانیکی منبع ارتعاش است. بنابراین لازم است که بین منبع مولد صوت و گوش یك محیط الاستیك موجود باشدتا این انرژی مکانیکی را منتقل کند.

پرسش ۱۲-۱- چگونه می‌توان نشان دادکه صوت در خلأ منتشر نمی‌شود؟

محیط انتشار صوت معمولاً هواست ولی مشاهدات روزانه نشان می‌دهدکه صوت درجامدات و مایعات نیز منتشر می‌شود.

انتشارصوت درمایعات وجامدات را می‌توان با آزمایشهای ساده‌ای که نمونه آنها در شکل (۱۲-۲ الف و ب) نشان داده شده است تحقیق کرد.

پرسش ۱۲-۲- نمونه‌هایی از انتشار صوت در جامدات و مایعات را که روزانه با آنها مواجه هستید بیان کنید.



شکل ۱۲-۲

الف- صوت دیاپازنی که به انتهای آن یك قرص فلزی نصب شده است توسط‌آب درون ظرف به‌جعبه تشدید صوت منتقل و به‌خوبی شنیده می‌شود.

ب- میله چوبی یا فلزی یا پلاستیکی صوت حاصل از دیاپازن را به جعبه تشدید صوت منتقل می‌کند.

۱- گوش سگ می‌تواند اصواتی را که تواتر آنها را بین ۱۵ هرتز و ۵۰٬۰۰۰ هرتز است بشنود. خفاش ویك نوع حیوان‌دریایی به‌نام Porpoise (گراز ماهی) که شباهت زیادی به دلفین دارد می‌توانند تا حدود تواتر ۱۲۰٬۰۰۰ هرتز رادریافت دارند یا خود تولیدکننده.

امواج صوتی درهوا وآب یا درهرسیال دیگر (اعم ازگاز یا مایع) چنان‌که گفتیم بـه‌طور طولی منتشر می‌شوند، یعنی در مسیر خود، مولکولهای سیال را در راستای انتشار به ارتعاش در می‌آورند و آشفتگی‌که به‌هنگام عبور موج درهرجزء ازحجم سیال به‌وجود می‌آید همواره‌توأم با تغییرات تناوبی فشار به صورت تراکم و انبساط است[1].

پرسش۱۲-۳- امواج‌صوتی پلاریزه‌نمی‌شوند. علت چیست؟

سرعت انتشار صوت

الف- سرعت صوت درگازها- در بخش ۱۰ ضمن بحث در باره امواج طولی‌متذکر شدیم‌که سرعت این امواج دریك محیط (که‌موجهای صوتی ازآن جمله‌اند) بستگی به‌خاصیت الاستیك‌آن محیط دارد. درگازهای کامل، خاصیت الاستیك بستگی به خواص ترمودینامیکی‌گاز (یعنـی تغییرات فشار و وحجم گاز با دما) در ناحیه‌ای که حرکت ارتعاشی منتشر می‌شود دارد. سرعت صوت درگازهای‌کامل از رابطه زیر که به «فرمول لاپلاس» معروف است حساب می‌شود:

$$v=\sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} \qquad (۱-۱۲)$$

که در آن P فشار گاز، ρ جرم حجمی گاز و $\gamma=\frac{C_p}{C_v}$ (γ حرف یونانی با تلفظ‌گاما) نسبت ظرفیت گرمایی ویژه گاز در فشار ثابت (C_p) به ظرفیت گرمایی‌ویژه‌گاز درحجم ثابت (C_v) است.

ظرفیت‌های گرمائی ویژه (C_p و C_v) از یك گاز به‌گاز دیگرمتفاوت است ولی نسبت $\frac{C_p}{C_v}$ برای گازهایی که اتمیسیته آنهایکی است (یعنی ملکولهای آنـها دارای تعداد اتمهای مساوی هستند) یکسان می‌باشد.

اندازه γ برای گازهای تك‌اتمی مانند آرگن (A) ونئون (Ne) وگازهای کمیاب دیـگر تقریباً ۱/۶۷ و برای گازهای دو اتـمی مـانند اکسیژن، ئیدروژن و نیتروژن (O_2 و H_2 و N_2) و همچنین برای‌هوا که تقریباً $\frac{4}{5}$ آن‌نیتروژن‌و$\frac{1}{5}$آن‌اکسیژن‌است تقریباً ۱/۴۰ وبرای گازهای سه اتمی مانند CO_2 تقریباً ۱/۳۳ است.

درکتاب فیزیك سال‌دوم دربخش گرما دیدیم که برای یك‌گازکامل،که حجم آن در دمای مطلق T و فشار P برابر V است نسبت $\frac{PV}{T}$ همـواره مقدار ثابتی است. اگر یك‌ملکول گرم گازکامل را درنظر بگیریم وحجم آن‌را درفشار P ودمای T به V_mنمایش دهیم نسبت $\frac{PV_m}{T}$ نیز مقدار ثابتی‌است که بستگی به‌دما وفشارگاز ندارد. این مقدار ثابت رابه R نمایش می‌دهیم بنابراین

$$\frac{PV_m}{T}=\frac{P_0V_{0m}}{T_0}=\dots=R \qquad (۲-۱۲)$$

۱- به‌کتاب فیزیك سال دوم نظری، بخش حرکـات موجی مراجعه‌کنید

مسئله مهم وجالب این است که R برای کلیه گازهای کامل مقدار ثابتی است و به‌همین‌جهت آن‌را «ثابت عمومی گازهای کامل» نامیده‌اند.

پرسش ۱۲-۴- با سابقهٔ آشنایی‌که از سالهای پیش درباره گاز کامل‌دارید دریك جمله کوتاه گاز کامل را تعریف کنید.

پرسش ۱۲-۵ - چرا با آن که جرم ملکولی گازهای مختلف‌یکی‌نیست مقدار ثابت R برای کلیه گازهای کامل یکی است؟

اگر به‌جای فشار p دررابطه (۱۲-۱) معادل آن $p=\frac{RT}{V_m}$ راکه‌ازرابطه(۱۲-۲) حساب می‌شود بگذاریم خواهیم داشت.

$$v=\sqrt{\gamma\frac{RT}{\rho V_m}} \quad (۱۲-۳)$$

ρV_m (یعنی حاصلضرب جرم حجمی گاز در حجم ملکول‌گرم آن) برابر جرم ملکولی گاز است که آن‌را به M نمایش می‌دهیم بنابراین:

$$\boxed{v=\sqrt{\gamma\frac{RT}{M}}} \qquad (۱۲-۴)$$

مقدار ثابت عمومی گازهای کامل، یعنی R، برابر ۸/۳۱۴ $\frac{\text{ژول}}{\text{مول . درجه کلوین}}$ $(\frac{J}{mol.°K})$ است γ و M هم برای‌یك گاز مورد نظر مقادیر ثابتی هستند بنابراین بادانستن γ و M ، سرعت صوت در گازموردنظر درهردمای T ازرابطه (۱۲-۴) حساب می‌شود. مثلا اگر هوارا در حکم گاز کامل بگیریم سرعت صوت‌درهوای صفردرجه‌سلسیوس (۲۷۳°K) که جرم ملکولی متوسط‌آن تقریباً ۲۹ $\frac{\text{گرم}}{\text{مول}}$ یا $۲۹\times۱۰^{-۳}\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{مول}}$ و $\gamma=۱/۴۰$ است برابر خواهد بود با:

$$v_\circ=\sqrt{\gamma\frac{RT_\circ}{M}}$$

$$=\sqrt{\frac{۱/۴۰\times۸/۳۱۴\times۲۷۳}{۲۹\times۱۰^{-۳}}}\simeq۳۳۱\frac{m}{s}$$

این‌سرعت بامقداری‌که ازاندازه‌گیری‌مستقیم به‌دست آمده است به‌خوبی مطابقت دارد.

پرسش ۱۲-۶ - باتوجه‌به‌این‌که حجم‌ملکول گرم گازهای کامل در شرایط استاندارد (فشار یك اتمسفر و دمای صفر درجه سلسیوس) برابر ۲۲/۴ لیتر است مقدار ثابت R را از رابطه (۱۲-۲) حساب کنید.

عوامل مؤثر برسرعت صوت در گازها

۱- اثردما - رابطه ۱۲-۴ نشان می‌دهد که سرعت صوت دریك گاز معین باجذر دمای مطلق گاز متناسب است. اگر $v_\circ$ سرعت صوت در گاز مورد نظر دردمای $T_\circ$ باشد به‌کمك رابطه زیر می‌توان‌با دانستن $v_\circ$ سرعت صوت‌را درآن گاز درهردمای T به‌دست آورد:

$$\frac{v}{v_\circ}=\frac{\sqrt{T}}{\sqrt{T_\circ}}$$

یا:

$$v=v_\circ\sqrt{\frac{T}{T_\circ}}=v_\circ\sqrt{\frac{T}{۲۷۳}} \qquad (۱۲-۵)$$

چون $T=۲۷۳+\theta$ است پس:

$$v = v_0\sqrt{\frac{273+\theta}{273}} = v_0\sqrt{1+\frac{\theta}{273}}$$

$$= v_0\left(1+\frac{\theta}{273}\right)^{\frac{1}{2}}$$

اگر θ در مقابل ۲۷۳ کوچک باشد می‌توان نوشت:

$$\left(1+\frac{\theta}{273}\right)^{\frac{1}{2}} \simeq 1+\frac{1}{2}\,\frac{\theta}{273} = 1+\frac{\theta}{546}$$

بنابراین وقتی که دمای گاز زیاد نباشد سرعت صوت در گاز از رابطه تقریبی زیر حساب می‌شود:

$$v \simeq v_0\left(1+\frac{\theta}{546}\right) \quad (۶-۱۲)$$

یادآوری ـ سرعت صوت در هوا را می‌توان مستقیماً از رابطه زیر حساب کرد:

$$v = v_0 + 0/610\,\theta \quad (۷-۱۲)$$

که در آن $v_0 = 331\frac{m}{s}$ سرعت صوت درهوای صفر درجه و θ دمای هوا برحسب درجه سلسیوس است این رابطه نشان می‌دهد که باافزایش هر $1^\circ C$، سرعت صوت در هوا تقریباً ۰/۶۱ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. مثلا سرعت صوت در هوای $20^\circ C$ برابر است با:

$$v = 331 + 0/610 \times 20 \simeq 343\frac{m}{s}$$

۲ـ اثر جرم ملکولی وجرم حجمی گازـ رابطه‌های (۱۲-۳) و (۱۲-۴) نشان می‌دهند که سرعت صوت دریک گاز نسبت معکوس باجذرجرم حجمی یاجذرجرم ملکولی گازدارد بنابراین هرچه گازسبکتر باشد سرعت صوت درآن بیشتر است. مثلانسبت سرعت صوت درگاز ئیدروژن به سرعت صوت درگازاکسیژن که هردو گاز دواتمی هستند دریک دمای معین برابر است با:

$$\frac{v_H}{v_O} = \sqrt{\frac{M_O}{M_H}} = \sqrt{\frac{32}{2}} = 4$$

یعنی سرعت صوت درگازئیدروژن که ۱۶ مرتبه سبکتر ازگاز اکسیژن است درشرایط یکسان ۴ برابر سرعت صوت درگاز اکسیژن است.

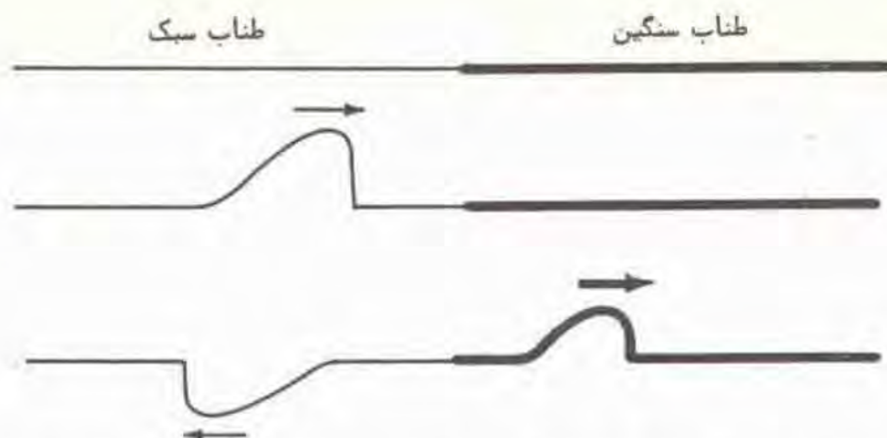
۳ـ اثر اتمیسیته گازـ اتمیسیته گازها نیز در سرعت صوت نقش مؤثری دارند وعامل اتمیسیته به‌صورت ضریب γ درفرمول وارد می‌شود.

پرسش ۱۲-۷ ـ رابطه (۱۲-۴) نشان می‌دهد که سرعت صوت به‌فشارگاز بستگی ندارد وآزمایش نیز این مطلب را تأیید می‌کند. آیا می‌توانید علت را بیان کنید؟

ب ـ سرعت صوت در مایعات وجامداتـ سرعت صوت درمایعات و جامدات معمولا بیشتر از سرعت صوت درگازها است درجدول ۱۲-۱، سرعت صوت درچندگاز ومایع وجامد برای مقایسه داده شده‌است

نوع ماده	سرعت صوت به‌متر بر ثانیه
هوا در صفر درجه‌سلسیوس	۳۳۱
ی‌اکسید کربن (CO_2) « « «	۲۵۸
منواکسید کربن (CO) « « «	۳۳۷
ئیدروژن « « «	۱۲۶۹
آب در دمای معمولی	۱۴۳۵
الکل	۱۲۱۳
بنزین	۱۱۶۶
آلومینیوم	۵۱۰۴
آهن	۵۱۳۰
چوب بلوط	۳۸۵۰
شیشه	۵۵۰۰
عاج	۳۰۱۳
مس	۳۵۶۰
نیکل	۴۹۷۳

جدول ۱۲-۱



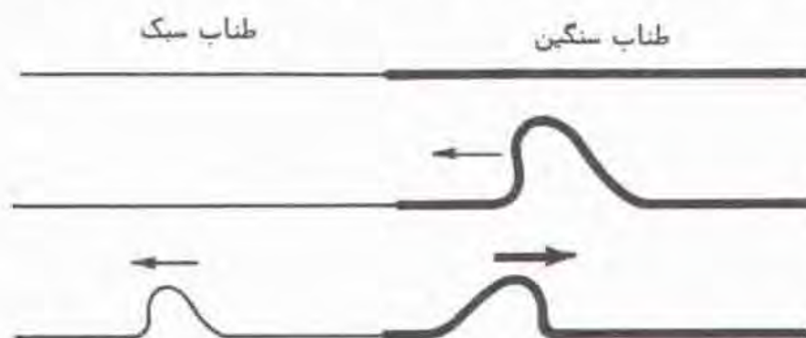
شکل ۱۲-۳- انعکاس یك آشفتگی ازمحل اتصال دوطناب موقعی که موج‌تابش‌ازطناب سبك بەطرف طناب سنگین می‌رود.

بازتابش یا انعکاس صوت

وقتی‌که امواج صوتی به مانعی برخورد می‌کنند ، یا به محیطی می‌رسندکه از محیط اولیه انتشار آنها غلیظتر یا رقیقتر است ، قسمتی از این امواج ازروی‌مانع یاازسطح‌مشترك دومحیط‌منعکس شده وبرمی گردد وقسمت دیگر در محیط جدید پیش می‌رود. اگر محیط کاملا سخت باشد امواج‌به‌طور کامل منعکس می‌شوند. برای روشن شدن مطلب، پیش ازآن‌که به‌بحث در بارهٔ بازتابش امواج صوتی به‌پردازیم آزمایش ساده‌ای رابیان می‌کنیم:

درشکل ۱۲-۳ دو طناب، یکی باریك و سبك و دیگری کلفت وسنگین نشان داده شده است‌که به هم متصل بوده و بین دو نقطه‌کشیده شده‌اند. اگر نخست درسرطناب سبك یك آشفتگی ایجاد شوداین آشفتگی هنگامی‌که به محل اتصال دوطناب می‌رسد قسمتی ازآن دراین محل منعکس شده وبرمی گرددو قسمتی ازآن هم‌به طناب‌سنگین منتقل شده‌به‌حرکت خود ادامه می‌دهد ،ولی آشفتگی‌که در طناب سبك برمیگردد جهتش وارونه میشود.

اگر آشفتگی نخست درسرطناب سنگین‌تولید شود موقعی‌که بـه محل اتصال دو طناب می‌رسد بازهم قسمتی از آن به‌طناب سبك منتقل می‌شود و

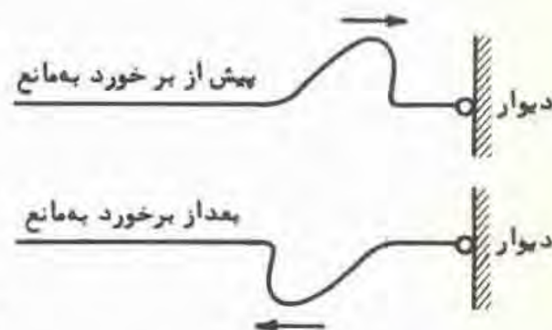


شکل ۱۲-۴- انعکاس یك‌آشفتگی ازمحل‌اتصال دوطناب موقعی‌که موج‌تابش ازطناب سنگین به طرف طناب سبك می‌رود

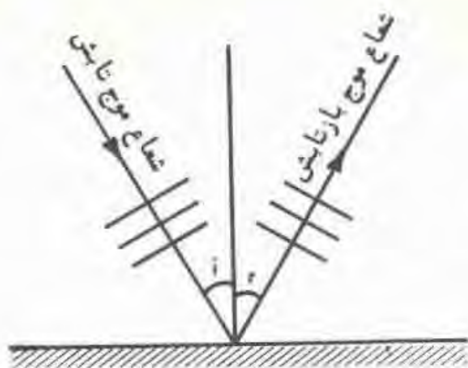
قسمت دیگر در محل اتصال منعکس شده در طناب سنگین برمی‌گردد ولی جهت آشفتگی برگشته مانند حالت پیش وارونه نیست (شکل ۱۲-۴).

پرسش ۱۲-۸ - آیاسرعت انتشار آشفتگی در دوقسمت طناب یکی‌است؟ اگر یك‌سر طناب‌به مانع بزرگ وسختی ،مثلا به‌یك قلاب‌که به دیوارکوبیده شده‌است متصل باشد ،موج رونده پس‌از برخوردبه مانع کاملا منعکس می‌شود. زیرا نیرویی که ازطرف موج‌به‌قلاب وارد می‌گرددنمی‌تواندديوار راحرکت دهد بنابراین انرژی‌که توسط موج درراستای‌طناب مطابق شکل ۱۲-۵ ازچپ به‌راست منتقل می‌شود نمی‌تواندطناب‌را ترك‌کنددرنتیجه موج کاملامنعکس می‌گردد و انرژی را از راست به طرف چپ منتقل می‌کند . علت وارونه شدن موج را می‌توان چنین توجیه‌کرد :

موقعی‌که‌موج‌تابیده به‌مانع‌می‌رسد می‌خواهد قلاب رابه طرف بالابکشد ولی‌قلاب‌تکان نمی‌خورد و طبق قانون عمل و عکس‌العمل نیرویی در جهت مخالف به‌طناب وارد می‌کند. این‌نیرو درتمام‌مدتی که‌موج درحال انعکاس است برطناب اثرمی‌کند ودر نتیجه موج بازتابیده وارونه می‌گردد .



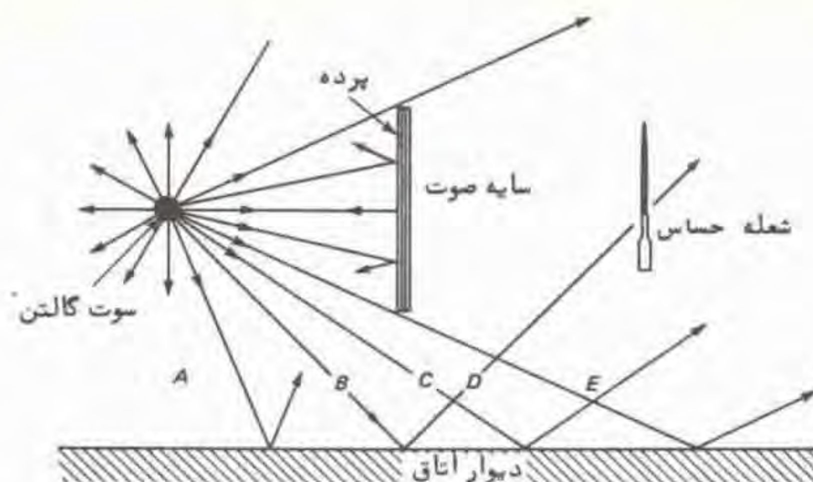
شکل ۱۲-۵- انعکاس موج ازروی یك‌مانع بزرگ‌وسخت.



شکل ۱۲-۶ شعاع موج جهت انتشار رامشخص می‌کند

بازتابش امواج‌صوتی نیزبه‌همین روال‌صورت می‌گیرد جزاین‌که امواج صوتی دریك محیط ایزو-تروپ‌به‌شکل موجهای‌کروی منتشر می‌شوند. برای این‌که بیان چگونگی بازتابش این‌امواج آسانترشود باید جهت انتشار موج مشخص‌گردد. معمولا جهت انتشار موج‌کروی یاموج مسطح به‌وسیلهٔ خطوطی که عمود برسطح موج هستند مشخص می‌گردد. هر يك از این خطها را «شعاع موج» می‌نامند و شعاع موج جهت انتشارموج را مشخص می‌کند.مثلا در شکل (۱۲-۶) شعاعهای تابش و بازتابش‌که عمود برسطح موج هستند جهت انتشار موج‌را پیش‌ازباز-تابش وپس از آن مشخص می‌کنند . آزمایش نشان می‌دهدکه زوایای‌تابش i وبازتابش r باهم برابرند. یعنی بازتابش امواج صوتی ازروی یك‌سطح ،مانند نور، تابع قوانین بازتابش است.

درآزمایشگاه می‌توان بازتابش امواج صوتی را باروشهای مختلف نشان داد. یکی ازاین روشها در شکل ۱۲-۷ نشان داده شده است. در این روش منبع تولید صوت ، يك سوتك میکرومتری به نام سوتك‌گالتون است‌که‌با دمیدن هوای‌متراکم درآن می‌توان صوتی باتواتر خیلی زیاد تولیدکرد. برای



شکل۱۲-۷- طرح ساده‌ای ازیك آزمایش برای نشاندادن انعکاس امواج‌صوتی از روی دیوار یك اتاق

آشکار ساختن پدیده انعکاس می‌توان از یك‌میکروفن حساس‌که متصل به یك نوسان نگارکاتودیك یا یك بلندگو است وبااز یك‌شعله حساس به‌عنوان‌دریافت کننده امواج بازتابیده استفاده‌کرد. شعله حساس عبارتست از یك شعله باریك و بلندکه‌مطابق شکل (۱۲-۸) درنوك یك لوله شیشه‌ای یا فلزی باریك در اثر سوختن‌گاز با جریان ملایم تولید می‌شود. وقتی‌که‌امواج‌صوتی ازروی‌نوك این لوله‌می‌گذرند شعله ناپایدار می‌شود و طول آن‌کوتاه می‌گردد.

میان منبع مولد صوت و دستگاه آشکار ساز، یك‌مانع سخت‌مانند یك‌تخته بزرگ قرارداده‌می‌شود به طوری‌که دستگاه آشکارساز در«سایه صوتی» این مانع واقع‌شود. دراین صورت‌امواج صوتی مستقیماً به‌آن‌نمی‌رسند بنابراین اگراین دستگاه‌امواج صوتی‌را دریافت‌کند دلیل براین است‌که این امواج در اثر بازتابش ازروی دیوار اتاق به‌آن می‌رسند. وقتی‌که سوتك دراثر جریان هوای متراکم به‌طور مداوم به صدا در می‌آید و دستگاه آشکار ساز دریافت امواج صوتی حاصل از انعکاس رانشان‌می‌دهد اگرآزمایش‌کننده درامتداد دیوار از طرف منبع مولد صوت به طرف آشکار ساز حرکت‌کند فقط در لحظه‌هائی‌که از وضعیتهای B وD می‌گذرد مانع‌رسیدن امواج‌منعکس



شکل ۱۲-۸-شکل ساده‌ای ازیك شعله حساس
وقتی‌که موجهای صوتی‌از بالای نوك‌لوله می‌گذرند ارتفاع شعله کم می‌شود.

به‌دستگاه آشکارساز می‌شود ودستگاه وضع‌عادی‌خود رانشان می‌دهد. زیرا فقط موجهائی‌که درراستای B به‌دیوار می‌تابند درراستایD روی آشکارسازمنعکس می‌شوند. پرتوهایی که‌درشکل نشان‌داده‌شده‌اندهمان شعاع‌موجهای‌کروی شکل صوتی هستندکه ازمنبع مولد صوت در هواپخش می‌شوند .

نمونه‌سایه صوتی‌که درشکل۱۲-۷ نشان‌داده شده است ویژه صوتهایی است‌که تواتر آنها زیاد و طول موجشان‌کوتاه است و نشان می‌دهدکه امواج صوتی‌کوتاه مانندنور به ظاهر به خط راست منتشر می‌شوند ،ولی صوتهایی‌که تواتر آنهاکم ودرنتیجه طول موجشان بزرگ است در موقع برخورد به لبه‌های مانع ازمسیر مستقیم خودمنحرف می‌شوند، به‌عبارت دیگر «تفرق»حاصل می‌کنند. مثلاهنگامی که یك اسباب موسیقی مجموعه‌ای از صوتهای زیر (باتواترزیاد) وبم (باتواترکم) رامجاور دیوار یك ساختمان تولید می‌کند ، هرگاه شنونده در یکی از زوایای ساختمان به کنار ساختمان بپیچد صوتهای زیررا به‌طور محسوس ضعیف می‌شنود درصورتی‌که صوتهای بم‌بازهم به طور وضوح شنیده می‌شوند . علت این است‌که صوتهای زیر (باطول موج‌کوتاه) روی لبه ساختمان‌کمتر تفرق حاصل می‌کنند ولی صوتهای‌بم (باطول‌موج‌بلند) تفرق‌حاصل می‌کنند.

در شکل (۱۲ - ۹) انعکاس امواج صوتی از روی دو آینه مقعر بزرگ‌که می‌توان آنها را در دوطرف اتاق مقابل‌هم قرارداد نشان داده‌شده‌است. هرگاه منبع تولید صوت درکانون یکی از آینه‌ها گذارده شود به وسیله دستگاه آشکار ساز به آسانی می‌توان پی‌بردکه صوت‌حاصل ازاین منبع درکانون آینه دیگر واضح‌تر از نقاط دیگر اطراف آن شنیده می‌شود.

شکست‌امواج صوتی

وقتی‌که امواج تناوبی‌ازیك محیط واردمحیط دیگر می‌شوند سرعت انتشار آنها و در نتیجه طول موجشان تغییر می‌کند. اگررابطه بین‌طول موج و تواتررا برای دومحیط (۱) و(۲) بنویسیم خواهیم داشت:

$$v_1 = \lambda_1 f \qquad \text{(۱) درمحیط}$$

$$v_2 = \lambda_2 f \qquad \text{(۲) درمحیط}$$

از تقسیم این‌دورابطه برهم نتیجه می‌شود

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

این رابطه نشان می‌دهدکه نسبت طول موج دردومحیط مساوی نسبت سرعتهای انتشار موج در آن دومحیط است. اگرموج ازیك محیط وارد محیط



شکل ۱۲-۹- صدای منبع تولید صوت (S) که درکانون یك آینه مقعر قرار دارد درکانون آینه دیگر واضح‌تر ازنقاط اطراف آن شنیده می‌شود.

دیگری‌شود که سرعت آن کمتر وطول موجش کوتاهتر گردد، سطح موجها به‌علت نزدیک‌شدن به‌هم‌طوری منحرف می‌شوندکه زاویه میل آنها نسبت به سطح مشترك دومحیط کمتر می‌گردد، به‌عبارت دیگرشعاع موج به‌خط عمود برسطح مشترك دومحیط نزدیکتر می‌شود . برعکس اگر موج وارد محیطی شودکه سرعت آن بیشتر و طول موجش بزرگتر شود سطح موجها از هم دورتر می‌شوند ودر نتیجه زاویه میل آنها نسبت به‌سطح مشترك دومحیط بیشتر می‌گردد به‌عبارت دیگرشعاع‌موج‌ازخط عمودبرسطح مشترك دو محیط دور می‌شود.

امواج صوتی نیز در اثر شکست درلایه‌های مختلف‌جو، که دمای آنها متفاوت است مسیرقوسی شکلی را طی می‌کنند، زیرا چنان‌که دیدیم سرعت صوت درهوای‌گرم بیشتر ازسرعت آن‌در هوای‌سرد است. مثلا هنگام قایق‌رانی روی‌یك دریاچه درشب صدای رادیو یاموزیك ساحل درفواصل نسبتاًدور از ازآن به خوبی شنیده می‌شود در صورتی‌که در روز شنیده‌نمی‌شود. علت‌این‌پدیده‌که درشکل (۱۲-۱۰) مجسم شده‌این است‌که در شب هوای مجاور سطح آب سردتر ازهوای طبقات بالاست، درنتیجه سرعت صوت درطبقات هوای‌بالا بیش‌از سرعت آن‌درطبقات هوای پائین است. این امر سبب می‌شودکه امواج صوتی در لایه‌های هوا طوری شکست پیداکنندکه زاویه‌میل آنها به‌تدریج افزایش‌یابد تااین‌که پس از انعکاس‌کلی دوباره به‌طرف پائین برگردند. در روز برعکس، دمای هوای مجاور سطح آب‌بیشتر ازدمای هوای طبقات بالاست و امواج صوتی به طرف بالا منحرف می‌شوند.

آزمایشهایی از این نوع در سالهای اخیر با



شکل ۱۲-۱۰-شکست امواج صوتی درطبقات مختلف هوا به علت تغییر دما.

صداهای شدید حاصل ازتوپهای بزرگ انجام شده‌و امواج صوتی آنها از طبقات بالای جو منعکس شده است. به‌وسیله این‌آزمایشها تا اندازه‌ای محقق شده است که‌درناحیه استراتوسفر درارتفاع بین ۴۰تا۶۴ کیلومتری سطح زمین طبقات هوای‌گرمی وجود دارد .

مشخصات صوت

اصوات‌را معمولا به‌دودسته تقسیم می‌کنند : اصوات موسیقی و صدا .

اصوات موسیقی به صوتهائی‌گفته می‌شودکه درگوش اثرمطلوب دارند. این‌اصوات معمولاتوسط اسبابهای موسیقی تولید می‌شوند . صوتهایی‌که در گوش اثر مطلوب ندارند صدا نامیده می‌شوند مانند صدای تفنگ ،صدای حاصل ازکشیدن‌سوهان

روی‌یك قطعه فلـز، صـدای خروج دود از اگزوز موتورسیکلت ومانند اینها.

باید درنظر داشت‌که اصوات موسیقی در اثر ارتعاش کاملا منظم‌اجسام‌کشسان (الاستیك) تولیـد می‌شونـد بـدون این‌کـه تغییر ناگهانـی در دامنه ارتعاش آنها حاصل شود، در صورتی‌که صداها به وسیله اجسامی‌تولید می‌شوندکه تواتر منظم‌ندارند. ولی‌این تنهااختلاف بین‌اصوات‌موسیقی وصدانیست زیرامثلا تیك‌تیك ساعت یك صدای منظم و تناوبی است ولی‌صوت موسیقی نیست . شرط اساسی برای تولیداصوات موسیقی‌این‌است‌که بین نتهای‌موسیقی که‌بتوالی هم ایجاد می‌شوند فاصله موسیقی منظمی موجود باشد. فاصله موسیقی دراین جانسبت‌تواتر ارتعاشات دو نت موسیقی است‌که بتوالی یکدیگر ایجاد می‌شوند.

اصوات موسیقی باسه‌صفت متمایز ازیکدیگر تشخیص داده می‌شوندکه‌آنهارا «مشخصات اساسی صوت»نامند. این مشخصات عبارتنداز:

بلندی ، ارتفاع ، طنین

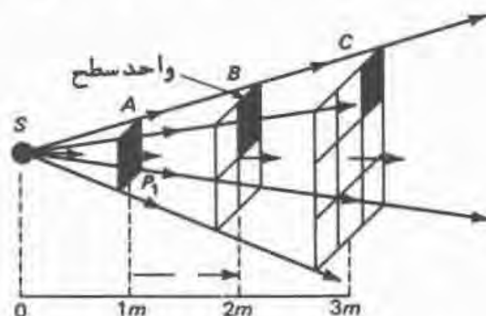
باید در نظر داشت‌کـه مشخصات نامبرده ، ذهنی هستند یعنی ویـژگیهایی هستندکه‌گوش آنها را احساس می‌کند. ازنظر فیزیکی این مشخصات به ترتیب مترادف باشدت ، تواتـر و شکل ارتعاشات می‌باشند. اینك به‌اختصار به‌شرح‌آنها می‌پردازیم.

الف ـ بلندی صوت ـ بلندی صوت ویژه تمام‌اصوات اعم ازصوتهای موسیقی وصداست وبامیزان‌احساس گوش ازصوتی‌که به‌آن می‌رسد ارتباط دارد. بلندی هرصوت بستگی به‌شدت آن‌صوت‌داردو شدت صوت بنابه تعریف ، مقدار انرژی صوتی است‌که درمدت یك ثانیه ازواحدسطح (مثلایك‌مترمربع) عمود برراستای انتشار امواج می‌گذرد . بنابراین شدت صوت‌کمیت فیزیکی است‌که ارتباطی با حساسیت‌گـوش ندارد ، درصورتی‌که بلندی صوت یك صفت فیزیولوژیکی‌است که‌هم بستگی به‌انرژی دهم بستگی به حساسیت‌گوش دارد .

درشدت‌صوت‌عوامل‌زیرمؤثرند:دامنه‌ارتعاش، فاصله‌شنونده ازمنبع‌تولید صوت‌وجنس محیط‌انتشار.

۱ـ بستگی شدت صوت بادامنه ارتعاش ـ دربخش حرکات ارتعاشی دیدیم‌که انـرژی حرکت ارتعاشی متناسب با‌مجذوردامنه ارتعاش است. چون‌متناسب بودن انرژی بامجذور دامنه ارتعاش در مورد همهٔ ارتعاشات صادق است بنابراین انرژی امواج‌صوتی ودر نتیجه شدت صوت هم متناسب بامجذور دامنه است. مثلا اگردامنه ارتعاش ۲یا۳ برابرشودشدت ۴یا۹ برابر می‌گردد .

۲ـ بستگی شدت صوت‌بافاصله ـ محاسبه وآزمایش نشان می‌دهدکه شدت‌صوت متناسب باعکس‌مجذور فاصله ازمنبع تولیدصوت است (قانون عکس‌مجذور فاصله). درشکل (۱۲-۱۱)، S نمایش یك‌منبع‌است



شکل ۱۲-۱۱ـ نمایش قانون عکس مجذور فاصله

که امواج صوتی گسیل می‌دارد. مقدار انرژی صوتی که درزمان معین ازواحد سطح (A) واقع در فاصله یک‌متری منبع S، می‌گذرد ازدوسطح B و C که به ترتیب درفاصله‌های دومتری وسه‌متری S، موازی با A قراردارند نیزمی‌گذرد زیرا این انرژی درجایی انبار نمی‌شود. چون مساحتهای این‌سطوح به‌نسبت ۱و۴و۹ هستند انرژی که درهرثانیه ازواحد سطح‌در هریک ازاین فاصله‌ها می‌گذرد به‌ترتیب به‌نسبت ۱ و $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{9}$ خواهد بود.

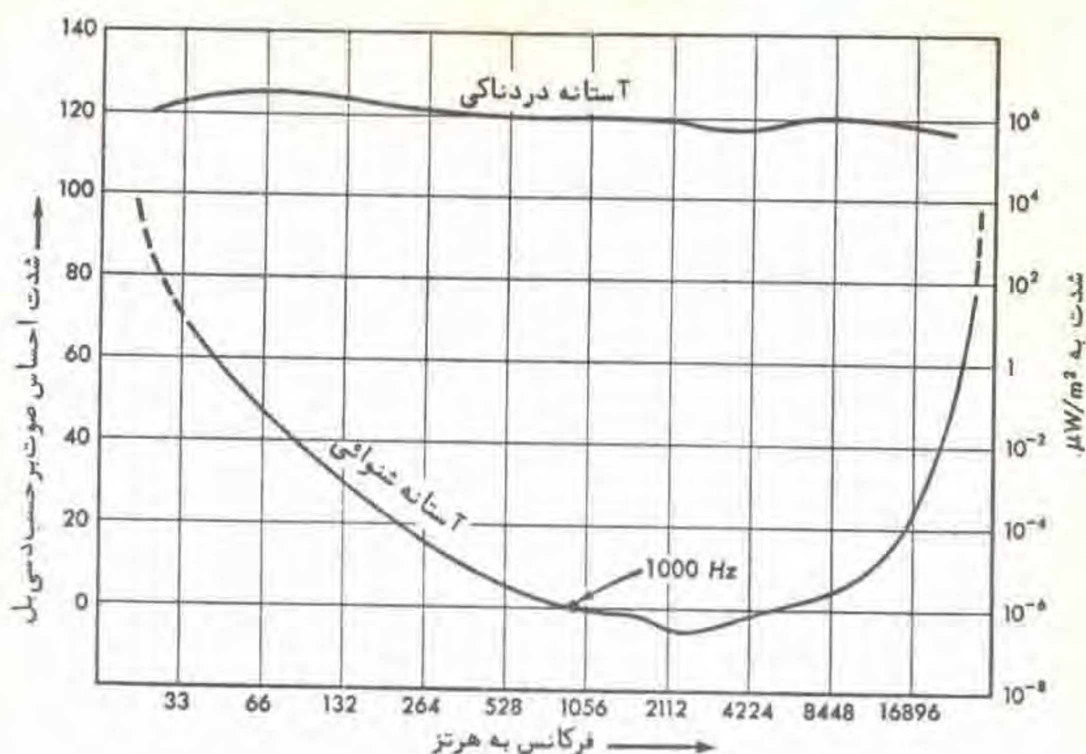
۳ـ اثر محیط انتشار در شدت صوت ـ محیطی که‌صوت‌درآن منتشر می‌شودکم وبیش انرژی‌صوتی راجذب می‌کند وآن قسمت ازانرژی صوتی که‌جذب محیط می‌شود به‌گرما تبدیل می‌گردد . محیطهایی که‌زیادجاذب انرژی‌هستند عملاصوت‌را خفه‌میکنند. توانایی جذب‌یک‌محیط برای‌امواج صوتی«انتخابی»[1] ست ، یعنی انرژی که در واحد زمان در ضخامت ینی ازمحیط مورد نظر جذب می‌شود بستگی به تواتر صوت داردمثلا هرچه تواتر صوت‌بیشتر باشد رهوا بیشتر جذب می‌شود.

ساسیت‌گوش انسان و نمودار شنوایی آن

گفتیم‌که بلندی یک صوت بستگی به شدت ت و حساسیت گوش دارد و حساسیت گوش هم رتباط بافرکانس صوت دارد ، بنابراین اصواتی‌که شدتشان یکسان ولی‌تواترشان مختلف است معمولا بابلندی متفاوت احساس می‌شوند . آزمایش نشان داده است که برای یک فرکانس معین اگر شدت صوت از یک حد معین کمتر باشد آن صوت دیگر شنیده نمی‌شود . این شدت حد را «آستانه شنوایی» نامیده اند. اگربرعکس شدت صوت را به تدریج افزایش دهند به حدی می‌رسدکه درگوش ناراحتی ودرد احساس می‌شود. این‌حد فوقانی‌شدت را «آستانه دردناکی »گوش نامیده اند . نتایج آزمایشهای بسیاری‌که با فرکانسهای متفاوت روی اشخاص مختلف انجام شده است نشان می‌دهدکه گوش انسان درحالت طبیعی به‌تواترهای از ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز حساستر است وحساسیت‌گوش برای تواترهای خیلی زیادتر یاخیلی‌کمتر از این حدودبه میزان زیادکاهش می‌یابد، به‌عبارت دیگر شدت‌لازم برای شنیدن تواترهای دو حد شنوائی (۲۰ هرتزو ۲۰۰۰۰هرتز) چندین‌برابر بزرگتر ازشدتی است‌که برای شنیدن تواترهای‌از ۲۰۰۰تا۴۰۰۰ هرتزلازم است. شکل (۱۲-۱۲) نمودار شنوائی گوش راکه درآن دوآستانه شنوائی و دردناکی برای تواترهای متفاوت نمایش داده‌شده‌است نشان می‌دهد.

برای تعیین شدت یک صوت، معمولا توان (یعنی انرژی درواحدزمان) آن‌را نسبت به‌توان‌یک صوت دیگر می‌سنجند . چون‌گوش انسان می‌تواند اصوات بسیاری راباگام‌انرژی بسیار گسترده‌دریافت کند ، برای این‌که نسبت این دو توان عدد بزرگی نشود معمولا به جای خود نسبت ، لگاریتم آن را حساب می‌کنند. بنابراین اگر P توان صوت مورد نظرو P_0 توان‌صوت‌مبنا به‌ازاء‌فرکانس‌معین‌باشد شدت

۱ـ خاصیت انتخابی محیط برای جذب صوت نظیر خاصیت انتخابی محیط برای جذب نور است که در کتاب فیزیک سال دوم با آن آشنا شده‌اید



شکل ۱۲–۱۲ ـ نمودار شنوائی گوش انسان که درآن آستانه شنوائی وآستانه دردناکی مشخص شده است .

نسبی احساس صوت ازرابطه زیرحساب می‌شود :

$$b = k\log_{10}\frac{P}{P_0} \quad \text{شدت احساس صوت} \quad (۸-۱۲)$$

k مقدار ثابتی است.

P_0 را معمولاً توان آستانه شنوائی گوش طبیعی برای تواتر ۱۰۰۰ هرتز انتخاب می‌کنند. این توان برابر 10^{-12} وات/مترمربع یا 10^{-6} میکرووات برمتر مربع ($\frac{\mu W}{m^2}$) است اگر $k=1$ باشد b برحسب واحد بل (به‌نام گراهام‌بل[1] مخترع تلفن) بیان می‌شودچون بل‌واحد بزرگی است در عمل به جای آن واحد کوچکتری به‌نام دسی‌بل که یک‌دهم بل است به‌کار می‌رود. بنابراین شدت‌احساس‌صوت برحسب دسی‌بل از رابطه‌زیر حساب می‌شود.

$$db = 10\log_{10}\frac{P}{P_0} \quad (۹-۱۲)$$

پرسش ۱۲–۹ ـاگر توان صوتی $10^{-3}\frac{\mu W}{m^2}$ باشد شدت احساس آن چند دسی‌بل است؟

در جدول (۱۲–۲) حدود توان چند صدا برحسب میکرو وات برمترمربع و شدت احساس آنها برحسب بل و دسی‌بل برای مقایسه داده است.

۱ ـ Alexander Graham Bell فیزیکدان امریکائی (۱۸۴۷ـ۱۹۲۲ میلادی).

جدول (۱۲-۲) حدود توان چند صدای ضعیف و قوی

نوع صدا	توان برحسب میکرووات برمترمربع	شدت احساس صوت: بل	شدت احساس صوت: دسی‌بل
آستانه شنوایی	10^{-6}	۰	۰
صدای نفس‌کشیدن معمولی	10^{-5}	۱	۱۰
صدای خش‌خش برگ‌درختان درنسیم	10^{-4}	۲	۲۰
صحبت‌کردن (از فاصله یك متر)	10^{-2}	۴	۴۰
همهمه درفروشگاه یا دفترکار	10^{0}	۶	۶۰
ترافیك شلوغ	10^{1}	۷	۷۰
ترن زیرزمینی	10^{4}	۱۰	۱۰۰
آستانه دردناکی	10^{6}	۱۲	۱۲۰
مسلسل	10^{7}	۱۳	۱۳۰
غرش هواپیمای جت معمولی درموقع بلندشدن	10^{8}	۱۴	۱۴۰
راکت فضائی موقع بلندشدن از زمین	10^{11}	۱۷	۱۷۰

ت

ا... **ارتفاع صوت**ـ ارتفاع، صفت ویژه اصوات م...قی است و با این صفت دونت زیر و بم از یك ...ر تشخیص داده‌می‌شود. ارتفاع یك‌صوت‌بستگی تواتر آن دارد: هرچه صوتی زیرتر باشد تواتر بیشتر است.

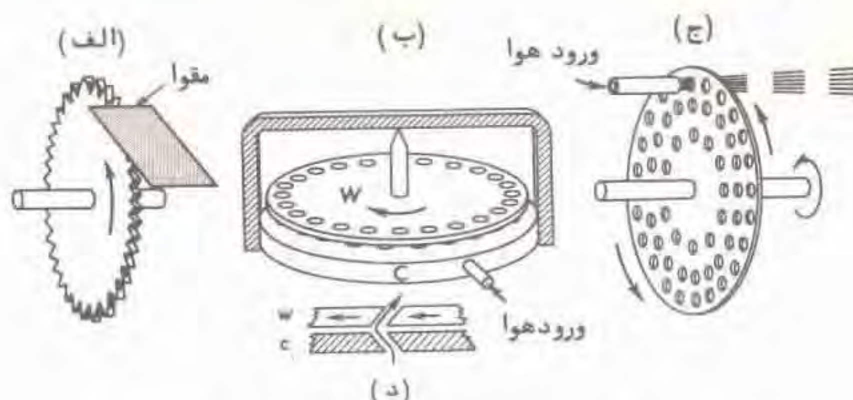
- اگر تواتر دوصوت یکی باشد ارتفاع آن دو نیز یکی است. در این صورت دو صوت را صو...اه گویند.

ا... **...سش ۱۲-۱۰**ـ به‌نظر شما با استفاده از ... همصدایی آیا می‌توان ارتفاع یك صوت را ...ین کرد؟

باید درنظر داشت‌که ارتفاع صوت یك‌کیفیت احساسی و فیزیولژیکی است درصورتی که تواتر یك کمیت فیزیکی است. بنابراین ارتفاع و تواتر یکی نیستند ولی احساس ارتفاع با تواتر بستگی دارد. با آزمایشهای ساده‌ای می‌توان این بستگی‌را نشان داد:

در شکل ۱۲-۱۳- الف یك چرخ دندانه‌دار (به‌نام چرخ ساوار[1]) نشان داده شده است‌که یك قطعه مقوا با دندانه‌های آن در تماس است. هرگاه چرخ را بچرخانند صفحه مقوا به‌ارتعاش درمی‌آید و صدا تولید می‌کند و هرچه سرعت دوران چرخ بیشتر باشد تواتر ارتعاش مقوا زیادتر می‌شود و صوت حاصل از آن زیرتر (و ارتعاش بیشتر) می‌گردد. برعکس اگر سرعت دوران چرخ کم شود تواتر صوت حاصل نیز کم می‌شود و صوت بم،

۱- Savart دانشمند فرانسوی (۱۷۹۱-۱۸۴۱)که تارهای مرتعش‌را مورد بررسی قرار داده است.



شکل ۱۲-۱۳- آزمایشهایی که نشان‌می‌دهند ارتفاع‌صوت بستگی به‌تواتر آن دارد.

یعنی ارتعاش کم می‌گردد. بدیهی است اگر p عده دندانه‌های چرخ و n عده دورهای آن در ثانیه باشد تواتر صوت حاصل ازصفحه مقوا برابرخواهد بود با:

$$f = p \cdot n \qquad (۱۰-۱۲)$$

شکل ب اسبابی به‌نام سیرن را (نظیر آن چه معمولاً در کارخانه‌ها برای اعلام شروع یا ختم کار مورد استفاده قرار می‌گیرد) نشان می‌دهد. هوای فشرده پس‌از عبور از سوراخهای کوچك و متساوی‌الفاصله قرص ثابت C، از سوراخهای قرص دوار W، که تعداد و قطرشان با سوراخهای موجود در قرص ثابت C برابر ولی شیب آنها برعکس است، (شکل د) نیز می‌گذرد وضمن عبور ازاین سوراخها نیرویی بربدنه آنها وارد می‌کندکه سبب چرخیدن قرص W می‌شود. همین‌که یك سوراخ دوقرص W از مقابل سوراخ مجاور خود در قرص C گذشت عبور هوا در لحظهٔ کوتاهی توسط فاصله بین دو سوراخ متوالی قطع می‌شود تا این‌که سوراخ بعدی جای آن را بگیرد. عبور متناوب جریان هوا از سوراخهای قرص دوار W ایجاد یك‌صوت موسیقی می‌کندکه تواتر آن مانند حالت پیش $f = p \cdot n$ است (دراین‌جا p عده سوراخها است).

شکل (ج) قرص سیرنی را نشان می‌دهد که به‌جای یك‌ردیف، چند ردیف سوراخ‌متساوی‌الفاصله (ولی باتعداد متفاوت) دارد و جریان هوای فشرده فقط توسط یك لوله ازسوراخها می‌گذرد. با ثابت نگاهداشتن لوله‌هوا مقابل هریك‌از ردیفها و تغییر دادن سرعت دوران قرص سیرن می‌توان اصوات موسیقی باارتفاعهای‌دلخواه ومتفاوت‌را تولیدکرد.

پرسش ۱۲-۱۱- در نظر بگیریدکه در یك قرص سیرن چندردیف (مثلا ۸ ردیف) سوراخ‌وجود داردکه هرردیف یکی‌از نتهای موسیقی‌را ایجاد می‌کند. اگر سرعت دوران قرص را تغییر دهیم از لحاظ اثر بر گوش‌کدام‌کیفیت تغییر می‌کند و کدام کیفیت ثابت می‌ماند؟

نتایج آزمایشهای متعددی که روی گوش اشخاص، چه موسیقی‌دان و چه‌عادی صورت‌گرفته است نشان می‌دهد که ارتفاع و تواتر یکی نیستند ولی با هم بستگی دارند.

پ- طنین صوت- طنین نیز مانند [1]ارتفاع، صفت ویژهٔ اصوات موسیقی است، با این صفت می‌توان صوتهای هم‌شدت و هم‌ارتفاع راکه ازمنابع صوتی مختلف تولید می‌شوند از هم تمیز داد. مثلاً وقتی که اعضاء یك ارکستر با سازه‌ای هم‌کوك خود یك نت خاص موسیقی را با هم می‌نوازند گوشی که با اصوات سازهای موسیقی آشناست صوتهای حاصل از سازهای متفاوت را از یك‌دیگر تشخیص می‌دهد. زیرا با آن‌که این صوتها هم‌شدت وهم‌ارتفاع‌هستند طنین متفاوت دارند.

برای این‌که کیفیت طنین بهتر شناخته شود صوت حاصل‌از یك دیاپازن را به‌وسیله نوسان‌نگار کاتدی‌میکروفن‌دار (شکل ۱۰-۱۹) بررسی‌می‌کنیم: وقتی که دیاپازن را بـه‌ارتعاش در می‌آوریم و جلو میکروفن نوسان‌نگار نگاه می‌داریم یك منحنی ساده سینوسی روی صفحه نوسان‌نگار ظاهـر می‌شود و نشان می‌دهدکه صوت دیاپازن یك‌صوت ساده‌است. هرصوتی که از یك حرکت ارتعاشی ساده سینوسی به وجود آید «صوت‌ساده» نامیده می‌شود. چنین صوتی معمولاً بی‌حالت وبی‌روح است‌که اثر آن درگوش نه خوشایند است و نه ناخوشایند وطنین‌آن ویژگی خاصی ندارد. ولـی اگـر همین دیاپازن مرتعش را روی جعبهٔ خاص تقویت صدا (جعبهٔ تشدید صدا) قرار دهیم منحنی که روی صفحه نـوسان‌نگار دیده می‌شود گرچه تناوبی است ولـی سینوسی نیست و معرف یك حرکت ارتعاشی مـرکب است. در ایـن صورت می‌گوئیم صوت‌حاصل، یك «صوت موسیقی مرکب» است . ایـن صوت دارای حالت و ویژگی خاصی است کـه به‌وسیله آن باز شناخته می‌شود. اصواتی‌که ازاغلب‌سازهای موسیقی تولید می‌شوند دارای حالت و ویژگی‌خاص‌خود هستندکه‌با اندکی آشنایی می‌توان آنها را تشخیص داد.

در بخش ترکیب حرکات ارتعاشی دیدیم‌کـه هرحرکت ارتعاشی مرکب با تواتر N را می‌تـوان به مجموعه‌ای از حرکات ارتعاشی ساده سینوسی با تواتر KN (که K عدد درستی است) تجزیه کـرد. براساس این خاصیت می‌توانیم هرصوت مرکب به تواتر N را مجموعه‌ای ازچند صوت ساده باتواتر KN بدانیم‌که همه باهم تولید می‌شوند.

بمترین صوت این مجموعه ($K=1$) «صوت اصلی» نامیده می‌شود، زیرا تواتر صوت مـرکب نیز برابر تواتر همین‌صوت اصلی است. بقیه صوتها راکـه تواتر آنها مضرب صحیحی از تواتر صـوت اصلی است «هماهنگ» (یا هـارمونیك) صوت اصلی می‌نامند. آزمایش نشان می‌دهـد هرتغییری‌کـه در تواتر یا در دامنه اجزاء صوت مرکب صورت‌گیرد سبب تغییر طنین آن می‌شود بنابراین:

طنین یك صوت موسیقی مرکب بستگی به‌تعداد هماهنگهای‌تشکیل‌دهنده صوت وشدت‌نسبی‌آنها دارد.

پرسش-۱۲-۱۳- آیاکیفیت‌طنین درتشخیص صدای اشخاص نیز مؤثر است؟

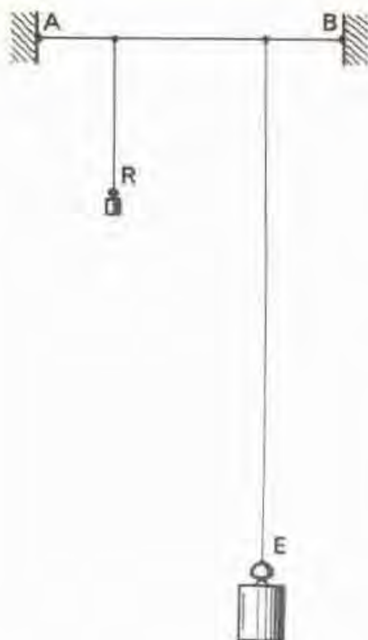
تشدید یا رزونانس[1]- هرگاه برجسمی که می‌تواند با پریده‌معین (پریدطبیعی) نوسان کند، ضربه‌های متناوبی که پریدآنها با پریدنوسان جسم برابراست وارد کنیم جسم شروع به‌نوسان می‌کند و دامنه نوسان‌آن به‌تدریج

1- Resonance

افزایش می‌یابد. ایـن پدیده را تشدید یا رزونانس گویند. چون معمولاً مقداری از انرژی جسمی که نوسان می‌کند دراثر اصطکاك به‌صورت گـرما تلف شود اگر انرژی ازدست‌رفته مرتباً به‌وسیله ضربه‌ها جبران‌شود دامنه نوسان جسم ثابت می‌ماند. تاب، نمونه ساده‌ای از پـدیدهٔ تشدید را نشان می‌دهـد، زیرا مجموعه تاب و شخصی‌که در آن نشسته است آونگی را تشکیل می‌دهد که پرید نوسان آن تابع طول آونگ است. اگر تواتر ضربه‌های واردبر تاب با تواتر آن یکی باشد دامنه نوسان تاب زیاد می‌شود.

پرسش ۱۲-۱۳- اگر پرید ضربه‌هایی که بر جسم نوسان‌کننده وارد می‌شود با پرید خاص جسم برابر نباشد آیا جسم نوسان می‌کند؟

در شکل (۱۲-۱۴) مثال دیگری از پـدیده تشدید نشان داده شده است:



شکل ۱۲-۱۴

پدیده تشدید وقتی اتفاق می‌افتدکه پرید دوآونگ یکی باشد.

دو وزنه E و R توسط دو رشته‌نخ به‌صورت دو آونگ ساده به‌یك پایه الاستیك‌که دراین‌جا سیم فولادی افقی AB است آویخته شده‌اند و وزنـه E سنگینتر از وزنـه R است. آونگ E را محرك و آونگ R را مشدد یـا رزوناتور می‌نامیم. طـول آونگ E ازابتدا بزرگتر ازطول آونگ R انتخاب می‌شود، درنتیجه پرید نـوسان آن بزرگتر از پرید نوسان آونگ R است. هرگاه در این حالت آونگ E را به نوسان در آوریم آونگ R به طور منظم نوسان نخواهد کـرد، بلکه چند نوسان کـم دامنه انجـام مـی‌دهد سپس متوقف مـی‌شود و این عمل مرتباً تکرار می‌گردد. علت این است‌کـه ضربه‌های متوالی آونگ محرك E از راه پـایه الاستیك AB به‌آونگ R منتقل می‌شود ولی پـرید ایـن ضربه‌ها باپرید نـوسانهای ویژهٔ آونگ R مطابقت نـدارد. اگر یکی از ایـن ضربه‌ها آونگ R را به نـوسان درآورد ضربه‌بعدی اثر آن‌را خنثی می‌کند ودرنتیجه آونگ R نمی‌تواند نوسان‌منظمی داشته باشد.

اگر طول آونگ محرك E را به‌تدریج کـم کنیم تا تواتر آن (f) رفته رفته زیاد شود وقتی‌که تواتر آن به‌تواتر خاص آونگ R (یعنی f_0)نزدیك می‌شود این آونگ شروع به‌نوسان منظم‌تری می‌کند و هرچه تواتر دو آونگ به یکدیگر نـزدیکتر شوند دامنه نـوسان آونگ R بیشتر مـی‌شود و در حالتی کـه $f = f_0$ است دامنه نوسان آونگ R به بیشترین مقدار خود می‌رسد و این، پدیده تشدید یا رزونانس است.

پدیده تشدید در بسیاری از مـوارد به‌ویـژه



شکل ۱۲-۱۵- دیاپازنهائی که روی جعبه تشدید قرار دارند پدیده تشدید را نشان می‌دهند.

درصوت مشاهده می‌شود: مثلاً اگر دوتار هم‌کوك مجاور هم باشند و سیم یکی از آنها را به ارتعاش درآورند سیم مشابه در تار دیگر نیز خـود به‌خود به‌ارتعاش درمی‌آید وهمان نت‌را تولید می‌کند.

شکل (۱۲-۱۵) نمونه‌دیگری ازپدیده‌تشدید را به‌وسیله دو دیاپازن یکسان کـه روی دو جعبهٔ تشدیدیکسان‌نصب شده‌اند نشان می‌دهد،اگریکی‌از دو دیاپازن مثلاً A را به‌ارتعاش درآوریم دیاپازن دیگر خود به‌خود به‌ارتعاش درمی‌آید ومی‌توان با متوقف‌کردن ارتعاشات دیاپازن A بـا دست، ادامه صوت را از دیاپازن B شنید. در این آزمایش جعبه چوبی زیـر هردیاپازن عمل تشدید و تقویت صوت را انجام می‌دهد. هرموج صوتی تقویت شده‌ای‌که از جعبهٔ زیـر دیـاپازن A گسیل می‌شود و وارد جعبهٔ دیاپازن B می‌گردد هـوای درون آن را بـه ارتعاش درمی‌آورد. با واردشدن ضربه به‌دیواره‌های این جعبه، دیاپازن B نیز با همان پریود بـه‌ارتعاش درمی‌آید. برای این که پدیده رزونانس صورت‌گیرد باید ابعاد دو جعبه و دیاپازنها کاملاً یکسان باشند تا تواتر ارتعاشات آنها مساوی شود.



شکل ۱۲-۱۶- رزوناتور هلمهولتز

پرسش ۱۲-۱۴- انرژی ارتعاشی کـه صرف ارتعاش هـوای درون جعبهٔ تشدید مـی‌شود از کجا تامین‌می‌گردد؟ آیا وجود این‌جعبه، استهلاك دامنه حرکت دیاپازن را تسریع می‌کند؟

پرسش ۱۲-۱۵- هرگـاه شخصی جلو یـك پیانو نت خاصی را به‌طور مداوم اجرا کند از پیانو صدای همان‌نت شنیده‌می‌شود. علت‌را توضیح‌دهید.

با استفاده از پدیده رزونانس می‌توان تواتر یك صوت‌را معین‌کرد و یا هارمونیکهای یك صوت مرکب‌را تشخیص داد. برای این‌منظور می‌توان از رزوناتورهـائی از نوع رزوناتور هلمهولتز[1] (شکل ۱۲-۱۶) استفاده‌کرد. فضای‌کروی‌شکل درون این رزوناتورها فقط به‌ازاء تواتر معین وحساب‌شده‌ای به ارتعاش درمی‌آید. منبع صوت محرك جلو دهانه A و زائده C درگوش قرار داده می‌شود.

ضربان- هرگاه دونت هم‌شدت کـه تواترهای آنها اختلاف‌جزئی دارند باهم نواخته شوند پدیده‌ضربان به‌وجود می‌آید. در آزمایشگاه برای ایجاد ضربان می‌تـوان از دو دیاپـازن شکل (۱۲-۱۵) استفاده

۱- Herman Helm Holtz (۱۸۲۱-۱۸۹۴ میلادی) فیزیك‌دان آلمانی که در نور و صوت و الکتریسیته تحقیقاتی انجام داده است.

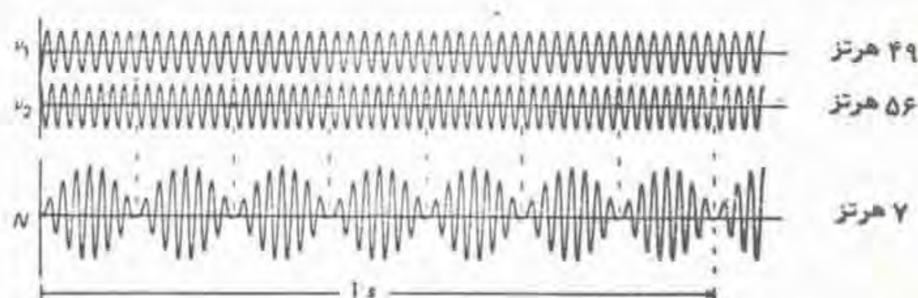
کرد و برای این کـه تواترهای دو دیاپازن اختلاف جزئی پیداکنند روی‌شاخه‌های یکی‌ازآنها وزنه‌ای کوچکی به‌شکل گیره‌که بـرای همین منظور ساخته شده است می‌بندند، یا یك قطعه کـوچك موم می‌چسبانند. در این حالت اگـر دو دیاپازن باهم به ارتعاش درآیند پدیده ضربان تـولید می‌شود. یعنی صوت حاصل‌از ترکیب صوتهای دو دیاپازن‌متناوباً قوی و ضعیف می‌شود.

نمودارهـای شکل (۱۲-۱۷) علت تـولید پدیده ضربان‌را نشان می‌دهند. دراین‌شکل، نمودارهای اولی و دومی نمایش ارتعاشات صوتهایی است که از دومنبع ایجاد صوت (دیاپازنها) به‌گوش می‌رسند و نمودار سومی نمایش منتجهٔ اثر آن‌دوصوت درگوش است. درلحظه‌هایی‌که ارتعاشات دو صوت به‌طور هم‌فاز به‌پرده گوش می‌رسند دامنه‌های آنها به‌هم اضافه می‌شونـد، درنتیجه دامنه صوت منتجه ماکزیمم است وصدا قوی شنیده می‌شود ودرلحظه‌هائی‌که ارتعاشات بـا فاز متقابل به‌گـوش می‌رسند دامنه صوت منتجه می‌نیموم‌است وصدا ضعیف‌شنیده می‌شود. این‌گونه قوی و ضعیف‌شدن متناوب صدا را ضربان‌گویند.

تعداد ضربانها در ثانیه برابر تفاضل تواتر دو صوت است[1] یعنی:

$$(f_2 > f_1) \quad \boxed{n = f_2 - f_1} \qquad (۱۰-۱۲)$$

مثالـ دیاپازنی‌که تواترآن معلوم نیست بادیاپازن دیگری که تواتر آن ۲۵۶ هرتز است ۴ ضربان در ثانیه تولید می‌کند. یك قطعه کوچك موم روی هر یك ازشاخه‌های دیاپازن می‌چسبانیم بازهم ۴ضربان درثانیه‌شنیده می‌شود. تواتراین‌دیاپازن‌را معین کنید.



شکل ۱۲-۱۷ ـ پدیده ضربان وقتی اتفاق می‌افتدکـه دو صوت‌که پریه آنها اختلاف جزئی‌دارند باهم نواخته شوند.

۱ـ پرید ضربان عبارت است از زمان ثابتی مانند θ که دوحالت قوی‌شدن متوالی صوت‌را از هم جدا می‌کند. نمودارهای شکل (۱۲-۱۷) نشان می‌دهندکه در زمان θیکی‌از دومنبع‌تولیدصوت یك‌ارتعاش‌کامل بیش از منبع دیگر انجام می‌دهد. بنابراین $n)\theta = nT_1 = (n+1)T_2$ تعداد ارتعاشهائی است کـه منبع صوت اول در زمان θ انجام می‌دهد). از این رابطه نتیجه می‌شود:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}$$

و یا $n = f_2 - f_1$ (نظیر این محاسبه‌را در استروبوسکپی بخش ۱۰ نیز دیده‌ایم).

در این جا، f_1 مجهول و $f_2=۲۵۶$ هرتز و $n=۴$ است.

تواترهای ممکن دیاپازن عبارتند از:

$$۲۵۶-۴=۲۵۲Hz$$
$$۲۵۶+۴=۲۶۰Hz$$

وقتی کـه روی شاخه‌های این دیاپازن موم چسبانده می‌شود باز هم $n=۴$ است در این حالت باز، تواترهای تغییر یافته که امکان وجودآنها هست عبارتند از:

$$۲۵۶-۴=۲۵۲Hz$$
$$۲۵۶+۴=۲۶۰Hz$$

چون وقتی‌که دیاپازن باموم سنگین تر می‌شود تواتر آن کاهش می‌یابد (ونمی‌تواند ثابت‌بماند یا افزایش یابد) قاعدتاً باید این تواتر از ۲۶۰Hz به ۲۵۲Hz کاهش یافته باشد بنابراین تواتر عادی دیاپازن ۲۶۰Hz است.

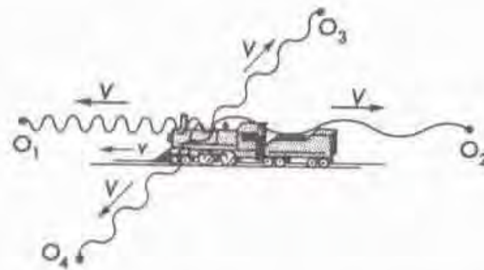
پدیده دوپلر- وقتی‌که یـک منبع تولید صوت، با سرعت به شنونده‌ای‌که ساکن است نزدیك ویا ازاو دور می‌شود ارتفاع صوتی‌کـه شنونده می‌شنود با حالتی‌که منبع تولید صوت ساکن است یکی نیست. هم‌چنین اگرشنونده‌ای باسرعت به‌یك‌منبع ساکن‌مولد صوت نزدیك یا از آن دور شود ارتفاع صوتی‌کـه می‌شنود با حالتی‌که نسبت به منبع‌صوت ساکن‌است تفاوت دارد. اغلب برای ما اتفاق افتاده است‌کـه یك اتومبیل‌بایك‌آمبولانس درخیابان یادرجاده بوق زنان یاآژیر کشان به‌سرعت در حرکت بوده است و در لحظهٔ عبور از کنار مـا تغییر فاحشی در ارتفاع صوت حـاصل از آن احساس شده است (در موقع نزدیك‌شدن، ارتفاع صوت حاصل از آن افزایش و هنگام دورشدن کاهش یـافته است) . در مسابقات اتومبیل‌رانی، موقعی‌که اتومبیل به‌ناظر ساکن در کنار مسیر حرکت، به‌سرعت نزدیك می‌شود صدای موتور آن «زیر» و هنگامی‌که از ناظر دورمی شود صدای آن «بم» احساس می‌گردد. هم‌چنین وقتی‌که یك قطار راه‌آهـن سوت‌زنان بهمـا نزدیك می‌شود صدای سوت آن را زیرتر و موقعی کـه از ما دور می‌شود صدای سوت آن را بمتر احساس می‌کنیم.

تغییری‌که در ارتفاع صوت، در اثـر حرکت نسبی منبع‌صوت و شنونده حـاصل می‌شود به‌نـام پدیده دوپلر[1] شناخته شده است. برای پی‌بردن به علت این پدیده مثال قطار را درنظر می‌گیریم:

وقتی کـه قطار ساکن است و سوت آن به‌صدا در می‌آید، امواج صوتی در همه جهات بـا سرعت یکسان پخش می‌شوند و همه ناظرهایی‌که در نقاط مختلف اطراف قطار قرار دارند وساکن هستندصدای سوت آن را بـا ارتفاع واقعی آن می‌شنوند، زیرا هرناظر درهرجا که‌باشد درمدت یك‌ثانیه همان تعداد موج را که سوت قطار می‌فرستد دریافت می‌کند در نتیجه پدیده دوپلر اتفاق نمی‌افتد.

اینك درنظربگیریم. قطار درجهتی‌که درشکل ۱۲-۱۸ نشان داده شده‌است حرکت می‌کند. بدیهی است حرکت سوت هم‌جهت با حرکت امواجی است که در جلو قطار منتشر می‌شوند و در خلاف جهت حرکت امواجی است کـه در عقب قطار پخش می‌گردند. درنتیجه، امواج صوتی درپشت قطار از هم

۱- Christian Doppler فیزیکدان و ریاضیدان اتریشی (۱۸۵۳-۱۸۰۳ میلادی).



شکل ۱۲-۱۸- پدیده دوپلر - صدای سوت قطار برای ناظری که قطار به‌او نزدیک می‌شود زیر و برای ناظری‌که قطار از او دور می‌شود بم و برای ناظرهای جانبی بدون‌تغییر احساس می‌شود.

باز می‌شوند و در جلو قطار به‌هم نزدیک و فشرده می‌گردند، به‌عبارت دیگر در مدت بین گسیل دو موج متوالی، قطار اندکی به‌موج پیشین‌که درجلو آن انتشار می‌یابد نزدیک واز موجی‌که درعقب آن منتشر می‌شود دور می‌گردد. چون سرعت انتشار صوت درتمام جهات یکی است، ناظری‌که درنقطه O_1 قرار دارد (و قطار به‌او نزدیک می‌شود) در هر ثانیه تعداد بیشتری موج‌نسبت به‌ناظری‌که درنقطه O_2 واقع است (و قطار از او دور می‌شود) دریافت می‌دارد . ولی برای ناظرهای O_3 و O_4 که روی راستای عمود برحرکت منبع‌صوت درفواصل نزدیک به‌آن واقع هستند ارتفاع صوت تغییر نمی‌کند. اگر f_s تواتر واقعی منبع صوت.

f_o تواتر صوتی‌که به گوش شنونده می‌رسد،

V سرعت انتشار صوت،

v_s سرعت حرکت منبع صوت،

v_o سرعت حرکت شنونده،

باشد، بستگی این‌کمیتها بـه‌یک دیگر در کلیه حالتها در رابطه زیر خلاصه می‌شود:

$$\boxed{\frac{f_o}{V-v_o}=\frac{f_s}{V-v_s}} \qquad (۱۱-۱۲)$$

دراین رابطه بنا بـه قـرار داد، جهت انتشار صوت به طرف شنونده مثبت فرض می‌شود و جهت حرکتهای‌منبع صوت‌وشنونده باآن‌مقایسه می‌گردد. بنابراین‌اگر v_o و v_s هم‌جهت با V باشندباعلامت مثبت واگر درخلاف جهت آن‌باشند باعلامت منفی منظور می‌شوند برای‌مثال حالتهای زیر را می‌توان در نظر گرفت:

I - اگرشنونده و منبع صوت به‌هـم نزدیک شوند v_o منفی‌و v_s مثبت است.

II - اگر شنونده ومنبع صوت ازهم‌دورشوند v_o مثبت‌و v_s منفی است. (زیرا جهت حرکت منبع صوت‌درخلاف جهت‌امواجی است‌که به‌طرف‌شنونده می‌روند).

III - اگر شنونده ومنبع صوت دریک جهت حرکت کنند ومنبع صوت درعقب شنونده باسرعت $v_s>v_o$ حرکت‌کند پیش از آن کـه منبع صوت از شنونده بگذرد v_s و v_o هردو مثبت هستند و تواتر صوتی‌که به‌گوش می‌رسد $f_o=f_s\frac{V-v_o}{V-v_s}$ است.

ولی پس ازآن که منبع صوت از شنونده جلو افتاد v_s و v_o بنابرآن چه‌گفته شد هردومنفی می‌شوند و تواتر ظاهری صوت $f_o=f_s\frac{V+v_o}{V+v_s}$ خـواهد

شد.[1]

حالتی که ممکن است بحث آن جالب باشد وقتی است که منبع صوت با سرعت V ۲ $= v_s$ به‌طرف ناظری که ساکن است ($v_o =$ ۰) نزدیک شود. در این حالت صوت وقتی شنید، می‌شود که منبع صوت از شنونده بگذرد و جالب این است که شنونده صدا را وارونه می‌شنود، مانند این که صوت ضبط شده روی یک نوار، از دستگاه ضبط صوت وارونه پخش شود.

---

۱ - برای این که با چگونگی محاسبه این گونه روابط آشنا شوید حالتی را که شنونده O به‌دنبال منبع صوت S حرکت می‌کند درنظر می‌گیریم. (شکل ۱۲-۱۹)



شکل ۱۲-۱۹

شنونده O به‌دنبال منبع صوت S هردو دریک جهت درحرکتند.

فرض می‌کنیم A و B دو نقطه ثابت هستند که درلحظه $t_\circ = \circ$ (لحظه‌ای که آن‌را مبدأ زمان می‌گیریم) از S به‌یک فاصله‌اند. موجی که دراین لحظه ازمنبع S گسیل می‌شود پس از گذشت زمان t به A و B می‌رسد. پس درلحظه $t_\circ$ داریم:

$AS = BS = Vt$. ولی پس از گذشت زمان t، این‌منبع مسافت $v_s t$ را طی می‌کند. بنابراین در لحظهٔ t داریم: $AS = Vt + v_s t$ و $BS = Vt - v_s t$. درمدت بین دولحظهٔ $t_\circ$ و t تعداد موجهایی که منبع S ارسال داشته است برابر $f_s t$ است (f_s تواتر واقعی منبع S است) واین موجها درفاصله بین AS و BS واقع هستند، بنابراین طول‌موج ظاهری درقسمت جلو S برابر است با: $\lambda = \dfrac{BS}{f_s t} = \dfrac{V - v_s}{f_s}$ وطول موج در قسمت عقب منبع S برابر است با: $\lambda' = \dfrac{AS}{f_s t} = \dfrac{V + v_s}{f_s}$.

حال در نظر بگیریم که شنونده با سرعت $v_\circ$ درهمان جهت‌حرکت S حرکت کند، سرعت‌حرکت موج‌نسبت به‌شنونده برابر $V + v_\circ$ است وچون شنونده O درعقب منبع S است طول‌موج ظاهری نسبت به او λ' است. بنابراین تواتر ظاهری موجی که دریافت می‌کند برابر است با:

$$f_\circ = \frac{V + v_o}{\lambda'} = \frac{V + v_o}{V + v_s} f_s$$

همین استدلال را می‌توانیم درحالات‌مختلف دیگر به‌کار بریم وارتفاع ظاهری‌را درهرحالت حساب‌کنیم.

مثال ـ دریک‌مسابقه‌اتومبیل‌رانی، اتومبیلی باسرعت $270\frac{km}{h}$ ازمقابل جایگاه داوران می‌گذرد تواتر واقعی صدای موتور آن ۵۴۰ هـرتـز است. تواتر صدایی که به‌گوش هر ناظر متوقف در جایگاه می‌رسد در دوحالت زیرچه اندازه است؟

الفـ وقتی‌که اتـومبیل به جـایگاه نزدیک می‌شود.

بـ وقتی که اتومبیل از جایگاه دورمی‌شود.

سرعت انتشار صوت ۳۴۲ متر برثانیه است.

ـ داریم

$$f_o = f_s \frac{V - v_o}{V - v_s}$$

مقادیر داده شده عبارتند از:

$$f_s = 540 Hz \text{ و } V = 342 \frac{m}{s}$$

$$\text{و} \quad v_s = 270 \frac{km}{h} = 75 \frac{m}{s}$$

چون ناظردرجایگاه ساکن‌است $v_o = 0$ است

الفـ هنگامی‌که اتومبیل به‌جایگاه نـزدیک می‌شود v_s مثبت است و داریم:

$$f_o = 540 \frac{342 - 0}{342 - 75} \simeq 692 H_z$$

بـ موقعی‌که اتومبیل ازجایگاه دور می‌شود v_s منفی وداریم:

$$f'_n = 540 \frac{342 - 0}{342 + 75} \simeq 443 H_z$$

تغییر فاحشی که در این دو حـالت در تواتر ظاهری صدا حاصل می‌شود به‌خوبی محسوس‌است.

پدیده دوپلـر منحصر به امواج صوتی نیست بلکه‌درامواج دیگر، مانند امواج‌الکترومانیتیک‌که نورراهم شامل می‌شوند نیزاتفاق می‌افتد.

منابع تولید صوتهای موسیقی

گفتیم صوتهای موسیقی اصواتـی هستند که اثر آنها بر گوش موزون و خـوشایند است، چـه جداگانه یکی پس از دیگری (به صورت ملودی) و چه باهم (به‌صورت هارمونی) نواخته شوند. چنان‌که دیدیم دو صفت ویژه اصوات موسیقی ارتفاع و طنین است‌که اولی‌بستگی به‌تواتر منبع تولید صوت و دومی بستگی به‌هماهنگهایی داردکه باهم ترکیب می‌شوند. تعداد ونوع هماهنگهائی کـه یك اسباب موسیقی تولید می‌کند بستگی به‌نوع اسباب وروش به ارتعاش درآوردن آن دارد.

علاوه براین اسباب باید بتواند تعداد زیادی ازنتهای موسیقی را[1] که فاصله موسیقی آنهامشخص وحساب شده است تولید کند.

۱ـ نت‌هایی‌که درموسیقی به‌کار می‌روند ارتفاع مشخص و درنتیجه فاصله موسیقی حساب شده‌ای دارند که مجموعاً یك‌گام موسیقی‌را تشکیل می‌دهند. اسامی نتهای یك‌گام طبیعی کـه فاصله‌های موسیقی نـتهای آن به‌پرده ونیم‌پرده تقسیم شده‌است به‌ترتیب زیر است:

	do	re	mi	fa	sol	la	si	(do)'
فواصل موسیقی نت‌ها نسبت به‌مبنای do	۱	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	۲
فواصل نتها نسبت‌به‌یکدیگر برحسب پرده ونیم‌پرده ⟵	پرده	پرده	نیم‌پرده	پرده	پرده	پرده	نیم‌پرده	

اسبابهای مولد اصوات موسیقی را معمولاً به سه‌دسته تقسیم می‌کنند: سازهای تاری، سازهای بادی وسازهای ضربی. برای این‌که چگونگی‌تولید صوت در این اسبابها مشخص شود نخست تارهای مرتعش و لوله‌های صوتی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

الف ـ تارهای مرتعش ـ تار مرتعش یک رشته سیم از جنس فولاد یا زه است‌که بین دو نقطه ثابت کشیده شده است ودر اثر ارتعاش به صدا درمی‌آید ازلحاظ تئوری، یک‌تار مرتعش بنا به تعریف عبارت است ازیک رشته‌سیم باریک وبلند و قابل انعطاف با مقطع ثابت (یکنواخت) که با دامنه کم در اطراف وضع تعادل خودمرتعش شود. چنین تارمرتعشی‌فقط جنبهٔ تئوری دارد و ایده‌آل است. تارهای مرتعش اسبابهای موسیقی ارتعاشات پیچیده‌تری دارند ولی اگر شرایط آنها به‌شرایط تارایده‌آل نزدیک باشد تاحد زیادی‌ازقوانین تارهای‌ایده‌آل پیروی‌می‌کنند.

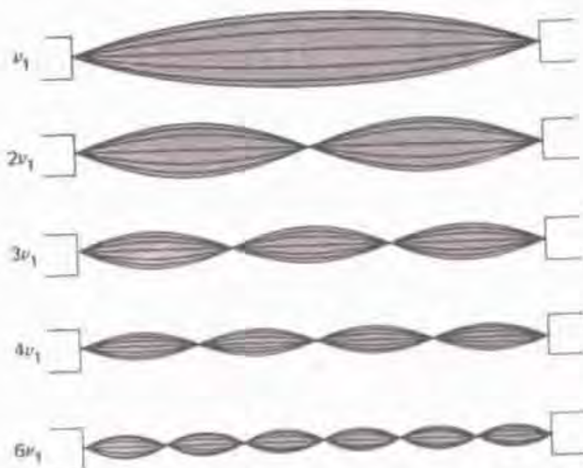
روش به‌ارتعاش درآوردن تارهای مرتعش در سازهای موسیقی یکسان نیست. مثلاً سیمهای ویولن باآرشه، سیمهای گیتار وچنگ با انگشت و سیمهای پیانو با چکش به ارتعاش در می‌آیند. تار مرتعش را درشرایط کاملا خاص می‌توان طوری به ارتعاش درآوردکه فقط یک‌شکم دروسط و دوگره‌در دو سرآن تولید شود. (شکل ۱۲-۲۰)

دراین حالت تار بمترین صوت خود، یا به عبارت دیگر، صوت اصلی خودرا تولیدمی‌کند.



شکل ۱۲-۲۰ـ طرز ارتعاش یک تارمرتعش هنگام تولید صوت اصلی

بایک تارمرتعش،علاوه‌برصوت اصلی‌می‌توان هماهنگ‌های دیگر این صوت‌راکه تواتر آنهامضرب صحیحی از تواتر صوت اصلی است نیز ایجاد کرد. برای این‌منظور کافی است هنگامی که سیم در حال ارتعاش است نوک انگشت‌را دروسط‌یادر $\frac{1}{3}$ یا در $\frac{1}{4}$ و ... طول‌سیم به‌طور ملایم‌تماس داد ومانع‌ارتعاش آن‌نقطه شد. در نتیجه وضع ارتعاش سیم به صورت حالتهای ۲ و ۳ و ۴ ... که در شکل (۱۲-۲۱)



شکل(۱۲-۲۱)ـ تولید هماهنگ‌های صوت اصلی درتارهای‌مرتعش

←

هرپرده‌معادل $\frac{9}{8}$ یا $\frac{10}{9}$ است‌که اختلاف آنها ناچیز است ونیم پرده معادل $\frac{16}{15}$ است نت '(do) که تواتر آن دوبرابر تواتر نت do (مبنای گام) است اکتا ونت مبنا نامیده می‌شود.

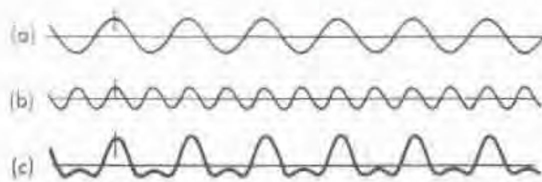
نمایش داده‌شده است درمی‌آید وتواتر صوت حاصل به‌ترتیب دوبرابر، سه‌برابر وچهار برابر تواترصوت اصلی تار می‌شود.

علت ایجاد گره و شکم در طول سیم، تشکیل امواج ایستاده در سیم است؛ وقتی که در یك نقطه از طول تار در اثر زدن ضربه یا کشیدن آرشه آشفتگی به‌وجود می‌آید این آشفتگی به‌صورت تك‌موج یادسته امواج درتار منتشرشده و از روی مانعهای سخت دو سر تار به طور وارونه برمی‌گردد واین عمل‌رفت و برگشت ادامه می‌یابد وسبب می‌شودکه درطول تارگره وشکم ایجادشود.

به‌آسانی می‌توان یك‌تار مرتعش‌را طوری به ارتعاش درآوردکه صوت‌اصلی خودرا باچندهماهنگ زیر، باهم ایجادکند. برای این منظورکافی است‌که ضربه محکمتری به‌یك طرف تار واردکنند (یا آرشه را محکمتر روی‌سیم بکشند). شکل ۱۲-۲۲ وضع ارتعاش یك‌تار مرتعش‌را به‌هنگام تولید صوت‌اصلی باتواتر f وهماهنگ‌دوم آن باتواتر ۲f نشان‌میدهد. به‌طوری‌که درشکل دیده می‌شود علاوه براین که یك‌شکم مربوط به‌صوت تار با تواتر f ایجاد شده است دوشکم دیگر مربوط به‌هماهنگ دوم با تواتر ۲f نیز درون شکم اول تشکیل گردیده است. در



شکل ۱۲ - ۲۲ - وضع ارتعاشی تار مرتعشی که صوت اصلی و هماهنگ دوم آنرا باهم ایجاد می‌کند.



شکل ۱۲-۲۳- ترکیب صوت اصلی وهم‌آهنگ دوم‌آن

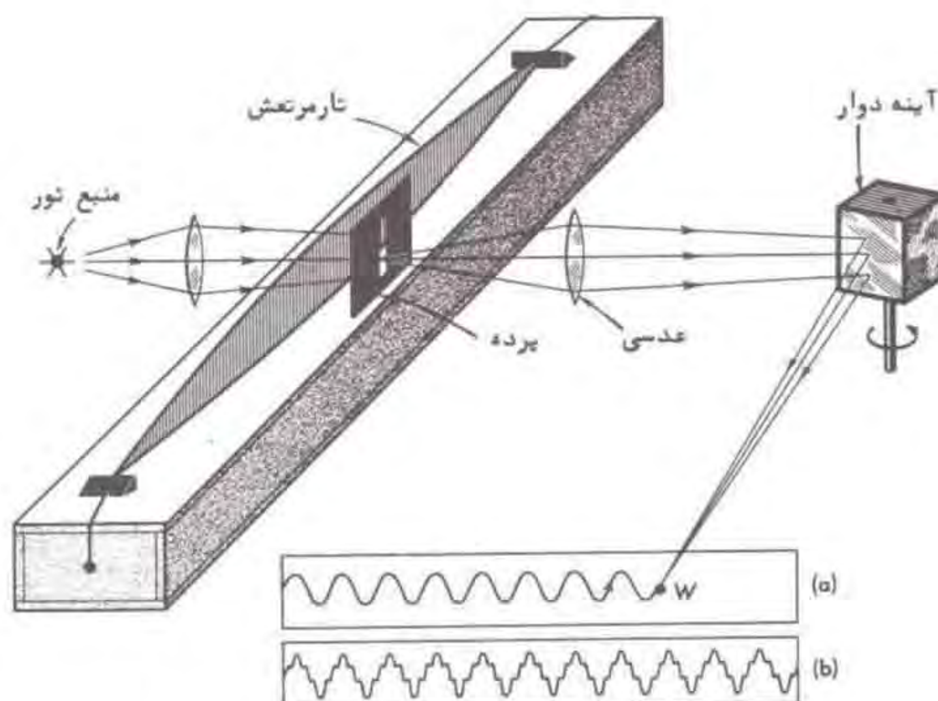
شکل (۱۲-۲۳) نموداراولی نمایش ارتعاشات‌صوت اصلی باتواتر f ونمودار دومی نمایش هماهنگ دوم باتواتر ۲f ونمودار سومی نمایش ترکیب‌این‌صوت است‌که برروی پرده‌گوش اثر می‌کند.

بایك آزمایش جالب‌که در شکل (۱۲-۲۴) نشان داده‌شده است می‌توان به‌کمك یك آینه دوار وضع ارتعاشی یك‌تار مرتعش‌را مجسم کرد:

نور قوی حاصل ازیك‌لامپ، توسط یك‌عدسی دروسط یك سیم فولادی مرتعش متمرکز می‌شود. برای این‌منظور می‌توان از یك دستگاه صوت‌سنج (سونومتر) که معمولاً در آزمایشگاهها موجود است[1] استفاده کرد. در محل تمرکز نور یك شکاف قائم کوچك‌که روی صفحه‌ای ایجاد شده است‌قرار دارد.

تصویر این شکاف و جزء کوچکی از سیم که مقابل شکاف است توسط یك‌عدسی دیگر، پس از بازتابش نور از روی سطح آینه دوار روی پرده‌ای تشکیل می‌شود. وقتی که سیم مرتعش شود و آینه نیز همزمان باارتعاش آن دوران کند روی پرده منحنی دندانه‌ای‌مشاهده می‌شود. اگر ضربه‌به‌ملایمی

۱- دستگاه صوت‌سنج معمولا ازدو رشته سیم‌فولادی تشکیل یافته است‌که روی یك جعبه‌چوبی تشدید، بین دوخرك کشیده شده‌اند وکشش سیمها قابل تنظیم است. به‌کمك این دستگاه می‌توان قوانین تارهای مرتعش را تحقیق کرد.



شکل ۱۲-۲۴ ـ آزمایش برای مشاهده وضع ارتعاشی یك تار مرتعش

بەوسط سیم وارد شود منحنی سینوسی سادەای‌مانند منحنی (الف) روی پردەدیده می‌شود ولی اگرضربه محکمی نزدیک بـه انتهای سیم وارد شود منحنی دندانه‌داری مانند شکل (ب) مشاهـده می‌گـردد، زیرا دراین حالت صوت اصلی همراه باچند هماهنگ آن تولید می‌شود.

فرمول وقوانین تارهای مرتعش ـ فرض‌کنیم کـه تار مرتعش وضع ارتعاشی ایده‌آل خـود را دارد و صوت اصلی خود را تولید می‌کند. بنابراین دوگره در دو انتهای تار و یـك شکم دروسط آن تشکیل مـی‌شود، و چـون همان طـور کـه گفتیم تشکیل گره وشکم به‌علت ایجاد امواج ساکن است، فاصله بین هردوگره متوالی برابر نصف طول موج‌است.

اگرطول تار رابه l نمایش دهیم برای صوت اصلی داریم:

$$\lambda = ۲l \quad \text{ویا} \quad l = \frac{\lambda}{۲}$$

ازطرف دیگر داشتیم:

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad \text{و} \quad \lambda = \frac{V}{f}$$

بنابراین:

$$f = \frac{V}{۲l} \qquad (۱۲-۱۲)$$

V سرعت انتشار امواج عرضی در طول تار است که بستگی به‌نیروی کشش‌تار وجرم‌واحدطول آن دارد وچنان‌که دیدیم از رابطه $V = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ حساب می‌شود بنابراین:

$$f=\frac{1}{2l}\sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (۱۳-۱۲)$$ تواتر صوت اصلی تار مرتعش

که درآن l برحسب متر و F برحسب نیوتن و μ برحسب $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{متر}}$ و f برحسب هرتز است.

اگر تار مرتعش هماهنگ k ام صوت اصلی خود را تولید کند طول تار مطابق آن چه در شکل (۱۲-۲۱) نمایش داده‌شده است برابر $k\frac{\lambda}{2}$ خواهد بود (زیرا فاصله هر دو گره متوالی $\frac{\lambda}{2}$ است) در این صورت تواتر هماهنگ k ام برابر خواهد بود با:

$$f_k=kf$$

یا

$$f_k=\frac{k}{2l}\sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (۱۴-۱۲)$$

از روابط بالا قوانین تارهای مرتعش به‌صورت زیر نتیجه می‌شود:

قانون اثر طول ـ تواتر صوت اصلی تار مرتعش با طول آن نسبت عکس دارد.

قانون اثر نیروی کشش ـ تواتر صوت اصلی تار مرتعش با جذر نیروی کشش تار متناسب است.

قانون اثر جرم ـ تواتر صوت اصلی تار مرتعش با جذر جرم واحد طول تار نسبت عکس دارد.

قانون هماهنگها ـ با یک تار مرتعش می‌توان هماهنگهای فرد و زوج صوت اصلی را نیز تولید کرد.

قوانین تارهای مرتعش را می‌توان عملاً به‌وسیله صوت‌سنج تحقیق کرد و درستی رابطه (۱۲-۱۴) را بررسی نمود.

مثال ـ یکی از سیمهای پیانویی دارای طول ۱/۱۰ متر و جرم ۰/۱۶۰ کیلوگرم است اگر تواتر صوت اصلی آن ۳۳/۰ هرتز باشد نیروی کشش آن چند نیوتن است؟

داریم:

$$f=\frac{1}{2l}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

یا:

$$F=4l^2f^2\mu$$

به‌ازاء $l=1/10\,m$ و $f=33/0\,Hz$

و

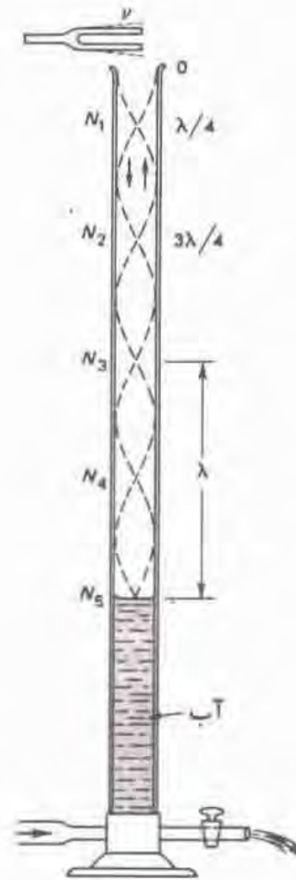
$$\mu=\frac{0/160}{1/10}\ \frac{kg}{m}$$

خواهیم داشت:

$$F=4\times(1/10)^2\times(33)^2\times\frac{0/160}{1/10}$$
$$\simeq 766N$$

ب ـ لوله‌های صوتی ـ لوله صوتی بنا به‌تعریف لوله‌ای است که وقتی هوای درون آن به‌ارتعاش درآید صوت‌تولید‌کند. چگونگی ارتعاش ستون‌هوای درون یک لوله صوتی را می‌توان با یک آزمایش ساده که در شکل (۱۲ ـ ۲۵) نشان داده شده است مجسم کرد:

یک‌دیاپازن الکتریکی که درحکم منبع‌ارتعاش است مقابل دهانه باز لوله بلندی که محتوی آب است نگاه داشته شده‌است وارتفاع آب درون لوله قابل تنظیم است. امواج صوتی حاصل ازدیاپازن در



شکل ۱۲-۲۵ - امواج صوتی حاصل از دیاپازن در صورتی که طول لوله مناسب باشد سبب تشکیل امواج ایستاده درهوای داخل ستون می‌شوند

ستون هوای‌درون لوله به‌طرف پایین حرکت‌می‌کنند وپس از برخورد به‌سطح آب‌که درحکم مانع سخت است به‌سمت‌بالا برمی‌گردند وباامواج تابش‌ترکیب می‌شوند. اگر سطح آب‌درون لوله بالا وپایین برده شود تاارتفاع ستون هوا مناسب برای‌تشدید صوت دیاپازن گردد امواج‌ایستاده به‌وجود می‌آیدوصدای دیاپازن‌تشدید می‌شود.

نخستین تشدید هنگامی صورت می‌گیرد که سطح آب در N_1 باشد و دراین حالت فاصله‌این‌سطح از دهانه لوله (به‌عبارت دیگر طول قسمتی از لوله که درآن صوت دیاپازن تشدید می‌شود) کوتاهترین مقدار ممکن است. دومین تشدید در N_2 اتفاق می‌افتدکه‌فاصله آن ازلبه لوله۳برابر حالت‌نخستین است وسومین تشدید در N_3 حاصل می‌شودکه‌فاصله آن ازلبه لوله ۵ برابر حالت اول است‌الی آخر.

علت فردبودن ضریب فاصله‌ها این است که همواره یک گره درانتهای بسته لوله (دراین‌جاسطح آب) ویک شکم دردهانه بازلوله تشکیل می‌شود.

امواج ایستاده درهوا دارای ماهیت طولی هستند ولی در این شکل و شکلهای بعد، برای آسانی کار به‌طور عرضی نمایش داده شده‌اند.

دراین آزمایش اگر تواتر دیاپازن معین باشد می‌توان سرعت انتشار صوت درهوای درون لوله‌را حساب کرد، زیرا فاصله بین هر دو گره متوالی $\frac{\lambda}{۲}$ وفاصله هر گره وشکم‌متوالی $\frac{\lambda}{۴}$ است، مثلاً، در یک آزمایش واقعی که دمای محیط ۲۷ درجه سلسیوس و فرکانس دیاپازن ۵۱۲ هرتز است فاصله دو گره متوالی یعنی $\frac{\lambda}{۲}$ برابر ۰/۳۴۰ متر است، باقرار دادن این مقادیر در رابطه $V=f\lambda$ سرعت V حساب می‌شود:

$$V = ۵۱۲ \times ۲ \times ۰/۳۴۰ = ۳۴۸/۲ \frac{m}{s}$$

وضع ارتعاشی هوا درلوله‌های صوتی‌باز وبسته- درشکل (۱۲-۲۶)، چند وضع ارتعاشی هوای‌درون لوله‌های صوتی بازوبسته به‌هنگام تولیدصوت نشان داده شده است.

ستون هوای درون لوله صوتی‌باز ممکن‌است

طوری مرتعش شود که:

۱- یک گره درمیان لوله و دوشکم در دو سر آن (که هردو باز هستند و با هوای خارج ارتباط دارند) تشکیل گردد. دراین حالت لوله صوت‌اصلی یعنی بمترین صوت خودرا تولید می‌کند و طول آن برابر نصف طول‌موج است.

۲- دوگره وسه شکم‌درآن به‌وجود آید. در این حالت لوله هماهنگ دوم صوت اصلی را ایجاد می‌کند وطول آن برابر دو تا نصف طول موج یا برابر یک طول موج است.

۳- سه‌گره وچهار شکم در آن تولید شود. دراین حالت لوله هماهنگ سوم صوت اصلی خودرا تولید می‌کند وطول آن برابر سه‌تا نصف طول‌موج است وجز اینها...

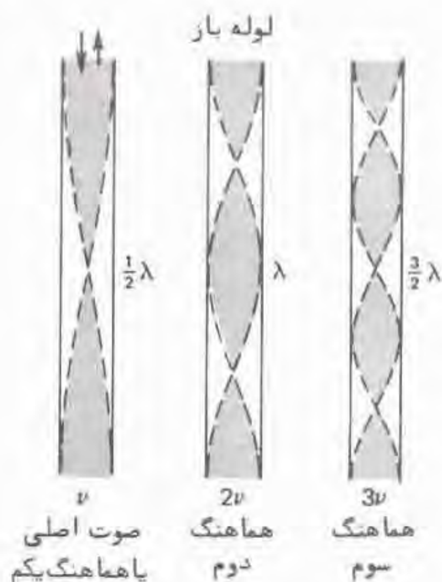
به‌همین ترتیب ستون هوای درون یک لوله صوتی بسته ممکن است طوری مرتعش شود که:

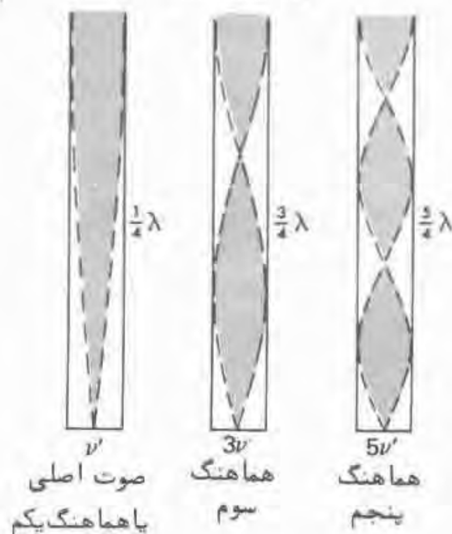
۱- یک‌گره در انتهای بسته و یکم شکم در سرباز لوله تشکیل گردد. دراین حالت لوله صوت اصلی یعنی بمترین‌صوت خودرا تولید می‌کندوطول آن برابر ربع طول موج است.

۲- دوگره و دوشکم درآن بـه‌وجـود آید. دراین صورت طول لوله $۳\frac{\lambda}{۴}$ است وهمـاهنگ سوم صوت اصلی لوله تولید می‌شود.

۳- سه‌گره وسه شکم درآن تشکیل شود. در این حالت طول لوله برابر $۵\frac{\lambda}{۴}$ است وهماهنگ‌پنجم صوت اصلی را تولید می‌کند وجز اینها...

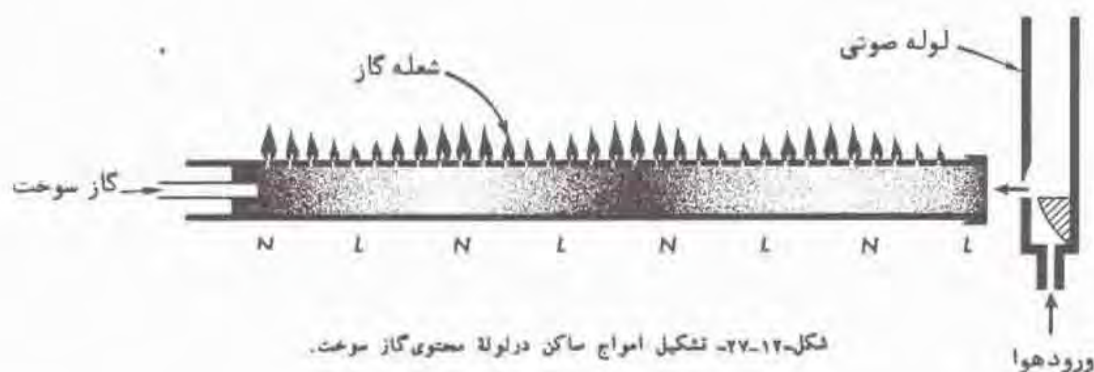
باید درنظر داشت‌که درتمام لوله‌های صوتی به‌هنگام تولید صدا، همیشه یک شکم درانتهای باز لوله‌ویک گره درانتهای‌بسته لوله تشکیل‌می‌شود.





شکل ۱۲-۲۶ - ستون هوای درون لوله‌های صوتی باز و بسته با تواتر معینی می‌تواند مرتعش شود

توجه به‌این نکته مهم است‌که فرکانسهایی‌که ممکن است توسط لوله‌های صوتی بازیا بسته‌تشدید شوند دارای اندازه‌های ثابت ومشخصی‌هستندکه فقط



شکل-۱۲-۲۷- تشکیل امواج ساکن درلولهٔ محتوی گاز سوخت.

بستگی به‌طول لوله وسرعت انتشار صوت درهوای درون آن دارند. مثلا اگرطول لوله‌ها درشکل (۱۲-۲۶) برابر ۶۰ سانتیمتر و سرعت انتشار صوت در هوای درون لوله ۳۴۸متربرثانیه باشد، لوله‌هادرحالتهائی که درشکل نشان داده شده است فقط با تواترهـای زیر می‌توانند مرتعش شوند:

لوله باز	۳f	۲f	f
	۸۷۰	۵۸۰	۲۹۰ هرتز
لوله بسته	۵f	۳f	f
	۷۲۵	۴۳۵	۱۴۵ هرتز

لوله‌های صوتی بسته فقط هماهنگهای فـرد صوت اصلی لوله رامی‌توانندتولیدکنند در صورتی که لوله‌های صوتی بازهمه هماهنگهای صوت اصلی اعم ازفرد یازوج را تولید می‌نمایند.

تشکیل امواج ساکن دریك ستون هوا یا گاز مرتعش را به هنگام تشدید می‌توان با لـوله دراز و سوراخ‌داری کـه محتوی گاز سوخت است مطابق شکل (۱۲-۲۷) به‌خوبی نشان داد.

در سراسر این لوله سوراخهای ریزی به‌فاصله‌های مساوی وجود دارد و گازی کـه از آنها خارج می‌شود باشعله باریك می‌سوزد. یك سرلوله باورقه کاغذ نازکی مسدود است که به وسیله منبع تـولید صوت (مثلاً یك لوله صوتی) مرتعش می‌شود و در سردیگر آن یك پیستون قرار داردکه لوله متصل به منبع گاز سوخت ازوسط آن می‌گذرد. وقتی که لوله صوتی به‌صدا درمی‌آیدوبا جلووعقب بردن پیستون درگاز درون لوله حالت تشدیـد پیدا می‌شود وضع شعله‌ها از حـالت یکنواختی اولیه خـارج شده بـه صورتی که در شکل دیده می‌شود درمی‌آید و مکان گرمها وشکمها را نشان می‌دهد. (در مکان گرمهـا طول شعله‌هـا بلندتـر است) . وضع تشکیل امواج ساکن در لولهٔ محتوی گاز را می‌تـوان بـا روش Kundt[1] نیز بررسی کرد به‌این ترتیب که لـولهٔ شیشه‌ای بلندی به‌طول‌تقریبی یك متررا افقی روی پایه‌هائی قراردادوسرتاسر درون آن گرد سبکی‌مانند

۱- فیزیك‌دان آلمانی (۱۸۹۴-۱۸۳۹) که درنور وصوت مطالعاتی دارد.

گردچوب‌پنبه‌ریخت، سپس یك‌دهانه‌لوله‌را باپیستونی مسدودکرد ومقابل دهانه دیگر، منبع‌تولید صوت‌را قرارداد؛ وپیستون‌را آنقدر جلو و عقب برد تاهوای درون لوله حالت‌تشدید پیداکند. دراین حالت‌ذرات چوب‌پنبه در نقاط تشکیل شکمها به شدت مرتعش می‌شوند و در گره‌ها ساکن می‌مانند. بدیهی است در هر دو روش نامبرده، اگر تواتر منبع ارتعاش مشخص باشد بااندازه‌گیری طول موج(که دوبرابر فاصله هر دوگره متوالی است) سرعت صوت درگاز داخل لوله حساب می‌شود.

فرمول وقوانین لوله‌های صوتی ـ ارتعاش هوای درون سازهای بادی‌که در موسیقی به‌کار می‌روند مانندآنچه‌درشکل (۱۲–۲۶) دیده می‌شودیکنواخت ومنظم نیست وبه‌همین دلیل فواصل گره‌های‌متوالی ازیك دیگر مساوی نبوده واصوات فرعی نیزدرست هماهنگ واقعی صوت اصلی نیستند.

بنابراین فرمول لوله‌های صوتی و بیان قوانین آنهارا محدود به‌حالت ساده‌ای می‌کنیم که:

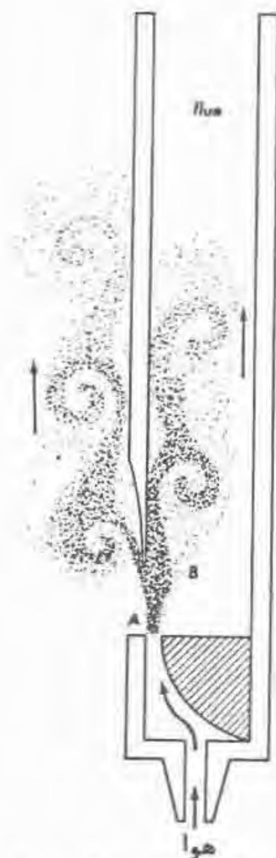
لوله مستقیم است.

مقطع‌آن ثابت ویکنواخت است.

قطر مقطع نسبت به‌طول لوله‌کوچك است.

دهانه آن لبه‌دار و به‌اصطلاح از نوع دهانه فلوتی است.

دراین نوع لوله‌های صوتی‌که لوله‌های‌ارگ نمونه‌های مشخص آنها هستند، جریان هوایی که درلوله دمیده می‌شود به‌وسیله لبهٔ تیغه تیزی‌که در شکل(۱۲–۲۸) مشاهده می‌گرددبریده‌شده ومتناوباً



شکل ۱۲–۲۸ ـ جریان‌هوا روی‌لبهٔ تیز تیغهٔ بریده شده وجریانهای گردبادی کوچکی در داخل وخارج لوله به‌وجود می‌آورد.

به داخل و خارج لوله رانده می‌شود وجریان گرد- بادی‌کوچکی درداخل‌وخارج‌لوله به‌وجودمی‌آورد. این‌جریان گردبادی متناوب سبب می‌شودکه هوای داخل‌لوله به‌ارتعاش درآید وهمان‌طورکه بیان‌کردیم امواج ساکن تشکیل شود ولوله صدا تولید کند.

وضع ارتعاشی منظم در هوای درون لوله باز و بسته (در شکل ۱۲–۲۶) نشان می‌دهد که در حالت کلی، طول لوله باز مضرب صحیحی از نصف طول موج[1]، وطول‌لوله‌بسته مضرب فردی ازربع طول موج

۱ـ می‌توان گفت که طول لولهٔباز مضرب زوجی ازربع طول موج‌است.

است. بنابراین:

در لوله‌های باز داریم:

$$l=K\frac{\lambda}{2}$$

اگر f_k تواتر هماهنگ K ام لوله باشد چون $\lambda=\frac{V}{f_k}$ است خواهیم داشت:

$$l=K\frac{V}{2f_k}$$

فرمول کلی لوله‌های صوتی باز

$$\boxed{f_k=K\frac{V}{2l}} \quad (15-12)$$

برای صوت اصلی لوله $K=1$ است وداریم:

$$\boxed{f=\frac{V}{2l}} \quad (16-12)$$

بدیهی است به‌ازاء $K=2$ ، $f_2=2f$ و به ازاء $K=3$ ، $f_3=3$ است و ...

در لوله‌های بسته داریم:

$$l=(2K-1)\frac{\lambda}{4}$$

($2K-1$ نمایش عدد فرد است). بنابراین: فرمول کلی لوله‌های صوتی بسته به‌صورت:

$$\boxed{f_k=(2K-1)\frac{V}{4l}} \quad (17-12)$$

است.

برای صوت اصلی داریم: $K=1$ و

$$\boxed{f=\frac{V}{4l}} \quad (18-12)$$

به ازاء $K=2$ داریم $f_2=3f$ و بـه ازاء $K=3$ داریم $f_3=5f$ و ...

روابط (۱۲-۱۶) و (۱۲-۱۸) نشان‌می‌دهند که‌درشرایط‌یکسان‌تواترصوت‌اصلی لوله صوتی‌بسته نصف تواتر لوله صوتی بازهم طول است.

قوانین لوله‌های صوتی را با توجه به روابط (۱۲-۱۵) و (۱۲-۱۷) می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

قانون طولها ــ «ارتفاع صوت اصلی حاصل از یك لوله صوتی، اعم ازلوله باز یا بسته، باطول لوله نسبت عکس دارد».

بدیهی است هر چه طول لوله کوتاهتر باشد تواتر صوت حاصل از آن بیشتر و صدای آن زیرتر است، به‌طوری‌که اگر طول لوله نصف شود تواتر صوت آن دوبرابر می‌گردد.[1]

قانون سرعتها ــ «تواتر صوت اصلی لوله‌های صوتی باسرعت صوت درگاز داخل لوله متناسب است».

۱ـ درواقع نتیجه‌ای‌که ازآزمایش به‌دست می‌آیددرصورتی باتئوری تطبیق می‌کندکه درطول لوله‌صوتی تصحیحی به‌عمل آید زیرا درانتهای بازلوله، شکم‌اندکی خارج ازلوله تشکیل می‌شود وطول مؤثر لوله اندکی بزرگتر از l است وباید فرمول‌های بالا تصحیح شوند. محاسبه نشان می‌دهدکه میزان تصحیح برای لوله بسته $0/3\ D$ (D قطرداخلی لوله است) و برای لولهٔ هر دو طرف باز $0/6\ D$ است. بنابر این درلوله بسته $f=\frac{V}{4(l+0/3D)}$ ودر لوله باز $f=\frac{V}{2(l+0/6D)}$

چون سرعت صوت تابع جنس گاز درون لوله ودمای آن است این عوامل درتواتر صوت‌لوله نیز مؤثرند. مثلا اگر جدار یك‌لوله صوتی فلزی را گرم کنیم ارتفاع صوت‌حاصل ازآن افزایش می‌یابد زیرا سرعت انتشار صوت درهوای گرم‌شده درون لوله افزایش می‌یابد.

قانون هماهنگها- لوله‌های صوتی باز تمام هماهنگهای صوت اصلی (چه فرد و چه زوج) را می‌توانند تولیدکنند درصورتی‌که لوله‌های صوتی بسته فقط می‌توانند هماهنگ‌های فردرا تولیدکنند.

یادآوری - جنس لوله وشکل مقطع آن، در صورتی‌که لوله محدود به‌حالت ساده‌ای که شرایط آن بیان شده‌باشد تأثیری درارتفاع صوت حاصل از آن ندارد.

خودتان آزمایش کنید

۱- دستگاهی‌مطابق‌شکل۱۲-۲۵درآزمایشگاه‌تهیه کنید ومنبع صوتی که‌تواترآن معلوم است (مثلا یك‌دیاپازن الکتریکی) مقابل دهانه آن نگاهدارید وسطح آب‌را درلوله کاملا بالابیاورید تانزدیك دهانه لوله قرارگیرد سپس به‌ملایمت سطح آب‌را پایین ببرید واولین وضع تشدید رابه دقت پیداکنید سپس سطح آب‌را پایین ببرید تادومین وسومین وضع تشدید پیداشود. در هروضع طول‌موج‌را اندازه بگیرید وبا دانستن تواتر منبع صوتی (f) سرعت صوت درهوای داخل لوله را ازرابطهٔ $V=f\lambda$ حساب کنید ومیانگین نتایج اندازه‌گیری را به‌دست آورید.

۲- اگر درآزمایشگاه صوت‌سنج دراختیار دارید قوانین تارهای مرتعش‌را بررسی کنید.

به‌این پرسشها پاسخ دهید؟

۱) صدای یك دیاپازن درنتیجه کدام یك ازعوامل زیرتولید می‌شود؟

۱- ایجاد امواج ایستاده در دیاپازن

۲- حرکت ارتعاشی ملکولهای دیاپازن

۳- انتشار امواج طولی در دیاپازن

۲) ماده‌ای را نام ببریدکه صوت درآن خوب منتشر نمی‌شود.

۳) ازعوامل زیرکدامشان درسرعت صوت مؤثرند؟

شکل امواج صوتی - دامنه امواج صوتی - تواتر صوت - بخار آب موجود در هوا - وزش باد

۴) اثر دما وفشار را برسرعت صوت در گازها شرح دهید.

۵) افزایش کدام یك ازعوامل زیرسبب کاهش سرعت صوت دریك گاز می‌شود؟

فشارگاز　　　　جرم حجمی گاز　　　　تواتر ارتعاشات صوت

۶- برای اندازه‌گیری سرعت صوت درآب دریا، چه‌طرحی را پیشنهاد می‌کنید؟

۷) چگونه می‌توانید نشان‌دهیدکه سرعت صوت دریك جامد، (مثلاً‌آهن) بیشتر ازسرعت صوت درهوا است؟

۸) چه‌شرطی باید باشد تابتوان پژواك یك‌صدا را ازصدای اصلی تشخیص داد؟

۹) شعاع موج چیست؟

۱۰) پنج رفتار موجی راکه می‌توان به‌وسیله امواج صوتی نشان‌داد نام ببرید.

۱۱) فرق بین انعکاس موج ازروی یك‌مانع سخت‌تر ازمحیط انتشارموج وانعکاس از روی مانع نرمتر ازمحیط انتشار موج چیست؟

۱۲) اگرسرعت امواج تناوبی به‌هنگام واردشدن دریك محیط‌کم شود، تواتر وطول موج و راستای انتشار آنها چگونه تغییر می‌کند؟

۱۳) بلندی صوت‌به‌چه عواملی بستگی دارد؟شرح دهید. چه‌فرقی بین‌بلندی وشدت‌صوت موجود است وچه وجه اشتراکی دارند وبا چه واحدهایی اندازه‌گرفته می‌شوند

۱۴) مشخصات ویژه اصوات موسیقی کدامند به‌اختصار شرح دهید.

۱۵) آستانه شنوایی یعنی‌چه؟ آیا استانه شنوایی همهٔ مردم یکی است؟

۱۶) گوش انسان درحالت طبیعی برای احساس چه‌اصواتی احتیاج به‌شدت کمتری دارد؟

۱۷) گاهی دربعضی از فیلمها نشان می‌دهندکه شخص دهان خودرا مقابل یك‌بطری یایك لیوان شیشه‌ای خالی‌قرار می‌دهد وآواز می‌خواند ودراثر پدیدهٔ رزونانس ،هوای درون آنهابه ارتعاش درمی‌آید وبطری یالیوان می‌شکند. در داستانهای مانیزگاهی اشاره به‌چنین مطلبی شده است! به‌نظر شما آیا چنین‌کیفیتی می‌تواند واقعیت داشته‌باشد؟ توضیح دهید .

۱۸) ضربان چیست ؟ چگونه می‌توان با استفاده از پدیده ضربان ، ارتفاع یك‌صوت را معین‌کرد ؟

۱۹) پدیده دوپلر چیست؟ ودرچه مواردی اتفاق می‌افتد.

۲۰) بامحاسبه نشان دهیدکه تواتر صوت اصلی تارمرتعش باقطر تارنسبت عکس دارد.

این مسئله‌ها را حل‌کنید

درحل این مسئله‌ها هرجا لازم باشد سرعت صوت در هوای صفردرجه سلسیوس را ۳۳۱

متر بر ثانیه بگیرید .

۱) سرعت صوت درمحلی ازقطب شمال راکه دمای هوا C° ۵۰ — است حساب کنید.

جواب: تقریباً ۳۰۰ متر بر ثانیه

۲) صوتی درآب تولید می‌شود وطول موج آن درآب $5m$ است. اگر سرعت انتشار صوت درآب $\frac{m}{s}$ ۱۴۲۰ و در هوا $\frac{m}{s}$ ۳۴۰ باشدتواتراین‌صوت وطول‌موج آن درهوا چیست ؟

جواب: ۲۸۴ هرتز وتقریباً ۱/۱۹متر

۳) صدای رعدشش ثانیه پس‌از جهش برق در ابر، به‌گوش ناظری در سطح زمین رسیده است. اگر دمای‌هوا C° ۲۷/۵ باشد جهش برق درابر،درچه فاصله‌ای ازناظر صورت گرفته‌است.

جواب: تقریباً ۲۰۸۷متر

۴) جرم ملکولی یک‌گاز دواتمی راکه سرعت صوت درآن‌در دمایC°۰ برابر ۱۲۶۰متر بر ثانیه‌است حساب‌کنید.

جواب ۲ $\frac{\text{گرم}}{\text{مول}}$

۵) سیرنی ۲۷ سوراخ دارد ودرحالی‌که باسرعت ۵ دور درثانیه می‌چرخد صوتی راایجاد می‌کند. سیرن دیگری‌که ۳۰ سوراخ دارد چنددور درثانیه باید به‌چرخد تا ارتفاع صوت حاصل ازآن دوبرابر ارتفاع صوت سیرن اولی بشود ؟

جواب: ۹ $\frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$

۶) ناظری مقابل پلکانی ایستاده است و دوکف دست خود را محکم بـه هم می‌زند و پژواك صدای دست خود را از پله‌ها به صورت صوت مستقلی می‌شنود . اگر عرض هر پله ۳۰ سانتیمتر ودمای هوا C°۲۷ باشد،

الف- سرعت صوت را حساب‌کنید ب- تواتر صوتی راکه ناظر می‌شنود معین‌کنید .

جواب: $\frac{m}{s}$۳۴۷/۵ و ۵۷۹Hz

۷) شدت صدای یك هـواپیمای جت ۱۲/۶ $\frac{\text{میکرووات}}{\text{مترمربع}}$ وشدت صدای یك هواپیمای دیگر که در فاصله دورتری پرواز می‌کند ۰/۴۵ $\frac{\text{میکرووات}}{\text{مترمربع}}$ است. بلندی نسبی صداهای دو هواپیما را حساب‌کنید. (بامراجعه به‌جدول لگارتیم جواب را معین‌کنید)

جواب: ۱۴/۴۷db

۸) طول یك‌سیم پیانویی در قسمتی که مرتعش می‌شود ۸۰ سانتیمتر است اگر این سیم با نیروی ۲۰۰۰۰ نیوتن کشیده شود تواتر صوت حاصل ازآن ۱۵۰ هرتز می‌شود. جرم این‌سیم را حساب کنید.

جواب: تقریباً ۲۷/۸ گرم

۹) طول یکی از سیمهای یك‌ساز موسیقی (چنگ) ۰/۵۲ سانتیمتراست و روی‌تواتر ۶۶۰ هرتز کوك شده‌است. طول‌موج هماهنگ پنجم این‌تاررا درسیم و درهوا حساب کنید.سرعت‌صوت‌را درهوا $350\frac{m}{s}$ بگیرید.

جواب: ۲۰/۸cm و ۱۰/۶cm

۱۰) یك‌سیم‌فولادی به‌طول ۲/۴۰متر و به‌جرم ۰/۸۰ گرم بانیروی 1600N کشیده شده است. تواتر هماهنگ پنجم آن‌را حساب‌کنید وشکل تار را درحالتی که هماهنگ پنجم را تولید می‌کندرسم‌کنید.

۱۱) طول‌یکی ازلوله‌های صوتی ارگی ۳/۵۰متر است (لوله‌باز). تواترهماهنگ پنجم این‌لوله راپیداکنید ووضع ارتعاشی لوله‌را بارسم شکل نشان دهید. سرعت صوت را در هوای داخل لوله $350\frac{m}{s}$بگیرید.

جواب: ۲۵۰ Hz

۱۲) کوتاهترین طول لوله صوتی بسته‌ای راپیداکنیدکه بتواند ارتعاشات یك‌دیاپازن‌به تواتر ۴۴۰ هرتز را تشدیدکند. سرعت صوت در هوای داخل‌لوله $350\frac{m}{s}$ است.

۱۳) یك‌لوله ارگ (لوله باز) طوری ساخته شده است‌که تواتر صوت حاصل از آن در دمای ۲۷°C برابر ۴۴۰ هرتز است. اگردمای محیط به‌صفردرجه تنزل‌کند چه‌تغییری درتواتر صوت آن حاصل می‌شود.

جواب: ۲۱ هرتزکم می‌شود

۱۴) یك‌لوله صوتی‌باز به‌طول ۰/۹۰ سانتیمتر درشرایط استاندارد (صفر درجه سلسیوس وفشاریك آتمسفر ازگاز CO_2 پرشده‌است.

الف‌ـ سرعت صوت دراین‌گاز را حساب‌کنید.

ب‌ـ تواتر صوت اصلی لوله را پیداکنید.

۱۵) دریك لوله صوتی‌باز به‌هنگام تولید صوت دوگره به‌فاصله ۵۰ سانتیمتر از یکدیگر تشکیل شده است. اگر سرعت صوت در هوای درون لوله ۳۴۰ متر برثانیه باشد طول لوله و

تواتر صوت اصلی را حساب کنید .

جواب : $1m$ و $170\ Hz$

۱۶) دو دیاپازن A و B با هم ارتعاش می‌کنند و ۴ ضربان در ثانیه شنیده می‌شود روی شاخه‌های دیاپازن B یك قطعه کوچك موم می‌چسبانیم ۶ضربان درثانیه شنیده می‌شود وزن‌موم راکمتر می‌کنیم دوباره ۴ ضربان درثانیه شنیده می‌شود. تواتر دیاپازن B را حساب کنید. تواتر دیاپازن A برابر ۴۸۰ هرتز است.

جواب: ۴۸۴ هرتز

۱۷) دولوله صوتی دردمای صفردرجه سلسیوس همصدا هستند وتواتر صوت اصلی آنها ۴۰۰ هرتز است. اگر دراثر بالارفتن دمای هوای درون یکی‌از لوله‌ها ۴ ضربان در ثانیه‌شنیده شود افزایش دمای لوله را حساب‌کنید: تغییر طول‌لوله دراثر دما ناچیز است.

جواب : $5/4\ ^\circ C$

پاسخ به‌پرسشهای متن بخش ۱۳

۱۲-۱) بـا قراردادن یك زنگ‌الکتریکی در حال‌کار زیر یك‌سرپوش دستگاه تخلیه هوا و خالی‌کردن هوای زیر سرپوش، وقتی‌که هواکاملاً خالی شود صدای زنگ شنیده نمی‌شود.

۱۲-۲) انتقال صوت از دیـوار، شیشه ولوله‌های‌آب وشوفاژ درخانه‌ها. شناگری‌که زیر آب است صدای ضربه روی سطح آب را می‌شنود.

۱۲-۳) زیـرا این امواج طولی هستند وامواج طولی نمی‌توانند پلاریزه شوند.

۱۲-۴) به‌طوری‌کـه درکتاب فیزیك سال دوم دیده‌اید گازکامل گازی است‌که تغییرات حجم و فشارش با دمای مطلق گـاز تابع قانون عمومی گازها (یعنی $\frac{PV}{T}=Cte$) باشد.

۱۲-۵) مقدار ثابت گـازهای‌کامل (یعنی $R=\frac{PV_m}{T}=\frac{P_\circ V_{\circ m}}{T_\circ}$) بستگی‌به‌جرم‌ملکول گرم‌گاز ندارد و حجم ملکول‌گرم‌کلیه‌گازها درشرایط ثابت همواره یکی است R نیز برای‌کلیه گازهای‌کامل یکی است.

۱۲-۶) به‌ازاء $P_\circ=1/013\times10^5\frac{N}{m^2}$ و $V_\circ=22/4Lit=0/0224m^3$ و $T_\circ=273^\circ K$ داریم:

$$R=\frac{P_\circ V_\circ}{T_\circ}=\frac{1/013\times10^5\times0/0224}{273}=8/314\frac{J}{^\circ K.mol}$$

۱۲-۷) علت، چنانکه می‌دانیم، این است که وقتی فشار گاز در دمای ثابت به میزان معینی افزایش می‌یابد جرم حجمی گاز نیز متناسب بافشار افزایش می‌یابد و نسبت $\frac{P}{\rho}$ تغییر نمی‌کند.

۱۲-۸) نه. زیرا سرعت بستگی به‌جرم واحد طول طناب داردکه در دو قسمت طناب یکی نیست.

۱۲-۹) ۳۰ دسی‌بل، زیرا $b = 10\log_{10}\frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 10\log 10^{3} = 10\times 3 = 30$

۱۲-۱۰) بلی. این کار را به‌وسیلهٔ یک‌سیرن می‌توان انجام داد، به‌این‌ترتیب که هم‌زمان با تولید صوت مجهول، سیرنی را (که دور سنجی روی محور آن نصب است) به‌صدادرمی‌آورند و تعداد دورهای آن را آن‌قدر تغییر می‌دهند تا صوت حاصل از آن با صوت مجهول یکسان شنیده شود. در این حالت ارتفاع دو صوت برابر است و از رابطه $f = np$ مشخص می‌شود. (n عده دورهای‌قرص‌سیرن درثانیه است که دورشمار نشان‌می‌دهد و p عده سوراخهای روی صفحه سیرن است) این کار را می‌توانْ مستقیماً به‌وسیله دستگاه نوسان‌ساز الکترونیکی انجام داد، به‌این ترتیب که صوت حاصل‌از دستگاه نوسان ساز را طوری تنظیم می‌کنندکه با صوت مجهول هم‌صدا شود سپس روی دستگاه مستقیماً ارتفاع صوت را می‌خوانند.

۱۲-۱۱) ارتفاع صوت حاصل‌از هرردیف تغییرمی‌کند ولی نسبت ارتفاع صوتهای حاصل از هردو ردیف متوالی (یعنی فاصله موسیقی آنها) ثابت می‌ماند.

۱۲-۱۲) بلی. هرشخص به‌سبب ساختمان حنجره و اندازه حجم حلق و دهان ویژه خود (که در حکم مشدد است) صدای خاصی داردکه با آن صدا شناخته می‌شود.

۱۲-۱۳) نه. این‌جسم نمی‌تواند نوسان منظمی داشته باشد. زیرا ضربه بعدی اثر ضربه قبلی را خنثی می‌کند.

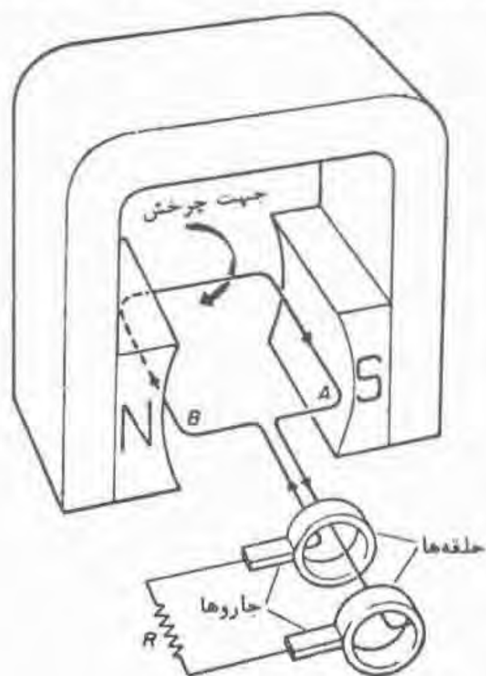
۱۲-۱۴) از خود دیاپازن. به‌همین جهت دامنه ارتعاشات دیاپازن سریعتر از حالتی‌که روی جعبه تشدید نیست مستهلک می‌شود.

۱۲-۱۵) علت، خاصیت تشدید است. زیرا سیمهای پیانوکه آن نت یا هماهنگهای آن را تولید می‌کنند به‌ارتعاش درمی‌آیند.

۱۳

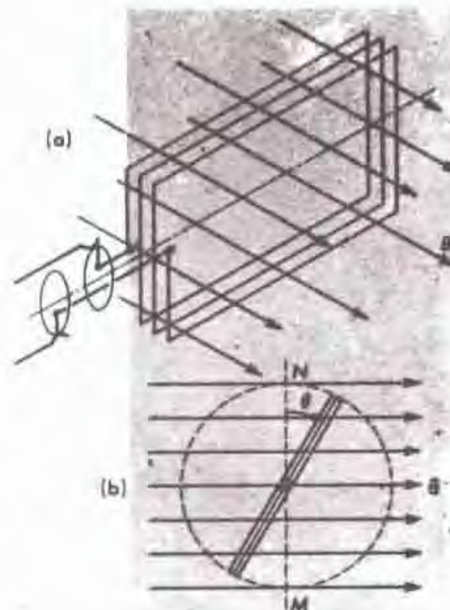
جریان متناوب

در سال پیش ضمن بحث دربارهٔ دیناموی مولد جریان متناوب گفتیم که جریان متناوب جریانی است که اندازه و سوی نیروی محرکه آن به طور تناوبی تغییر می‌کند. عامل تولید این جریان چنانکه می‌دانیم تغییرات متناوب شار مغناطیسی در سیم‌پیچهایی است که یا خود در میدان مغناطیسی یکنواخت با سرعت زاویه‌ای ثابت می‌چرخند ویا این که سیم‌پیچها ساکن هستند و قطبهای آهن‌ربا با سرعت زاویه‌ای ثابت درمقابل آنها می‌چرخند. دراین بخش نخست اساس ایجاد جریان متناوب را برپایه علمی‌تری بررسی خواهیم کرد و سپس مدارهای جریان متناوب را مورد مطالعه قرار خواهیم داد.



شکل ۱۳-۱- مولد ساده جریان متناوب

اساس تولید جریان متناوب. در نظر بگیریم که سیم پیچ قاب مانند یك دیناموی ساده مولد جریان متناوب، بین دو قطب آهن‌ربا، حول محوری که عمودبر خطوط نیروی‌میدان است‌با سرعت زاویه‌ای ثابت ω می‌چرخد (شکل ۱۳-۱). می‌توانیم قاب را به‌صورت سطحی در نظر بگیریم که در میدان مغناطیسی یکنواخت به دور محور خود می‌چرخد و در اثر تغییر شار مغناطیسی که از این سطح می‌گذرد نیروی محرکه القائی ایجادمی‌شود (شکل ۱۳-۲). برای محاسبهٔ نیروی محرکه این جریان، مبدأزمان(یعنی‌لحظه $t_0 = 0$)را لحظه‌ای‌می‌گیریم که سطح قاب بر خطوط نیروی میدان مغناطیسی عمود است. در این حالت شار مغناطیسی که از سطح‌قاب می‌گذرد ماکزیمم است. پس از گذشت



شکل ۱۳-۲- اساس تولید جریان متناوب.

زمان t قاب به‌اندازه زاویه $\theta = \omega t$ می‌چرخد و دراین حالت شارمغناطیسی‌که از سطح قاب‌می‌گذرد برابر است با:

$$\varphi = BA\cos\omega t \qquad (۱-۱۳)$$

که در آن B شدت میدان مغناطیسی و A مساحت سطح قاب است. این شار مغناطیسی متغیر در هر دور سیم پیچ قاب نیروی محرکه القائی تولید می‌کند که اندازه آن، چنان که دیدیم از رابطه $E_1 = -\frac{d\varphi}{dt}$ حساب می‌شود و در صورتی که قاب شامل N دور سیم پیچ باشد نیروی محرکه کل القاء شده در سیم‌پیچ قاب برابر است با:[1]

$$E = -N\frac{d\varphi}{dt} = NBA\omega\sin\omega t \qquad (۲-۱۳)$$

رابطه بالا نشان می‌دهدکه نیروی محرکه متناوب القا شده در سیم‌پیچی که با سرعت زاویه‌ای ثابت ω در یك میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد یك نیروی محرکه سینوسی به‌صورت زیر است:

$$\boxed{E = E_m \sin\omega t} \qquad (۳-۱۳)$$

که در آن $E_m = NBA\omega$ نیروی‌محرکه ماکزیمم است. نیروی محرکه درلحظه‌هائی ماکزیمم می‌شود که $\sin\omega t$ ماکزیمم یعنی برابر ۱ باشد.

مثال- یك‌سیم‌پیچ مسطح به‌شکل قاب به‌ابعاد ۱۰/۰ سانتیمتر در ۲۰/۰ سانتیمتر که دارای ۶۰ دور سیم است با سرعت ۱۸۰۰ دور در دقیقه دریك میدان مغناطیسی یکنواخت به‌شدت ۰/۵۰ تسلا به دور محور خود که عمود برخطوط نیروی میدان است می‌چرخد. نیروی محرکه القائی ماکزیمم را درقاب حساب کنید.

-داریم $E_m = NBA\omega$

به‌ازاء $N = ۶۰$ و $B = ۰/۵۰T$ و

$$\omega = ۲\pi f = ۲ \times ۳/۱۴ \times \frac{۱۸۰۰}{۶۰} = ۱۸۸/۴\frac{rad}{s}$$

۱- در درس‌ریاضی دیده‌اید‌که مشتق تابع $y = A\cos x$ نسبت به x برابر $y' = -A\sin x$ است. اگر x خود تابعی‌ازیك‌متغیر دیگرمانند t باشدمشتقy نسبت به t چنین‌است: $y'_{(t)} = -A\sin x \cdot x'_{(t)}$. بنابراین $\frac{d\varphi}{dt}$ برابر است با: $-NBA\sin\omega t \cdot \omega = -NBA\omega\sin\omega t$

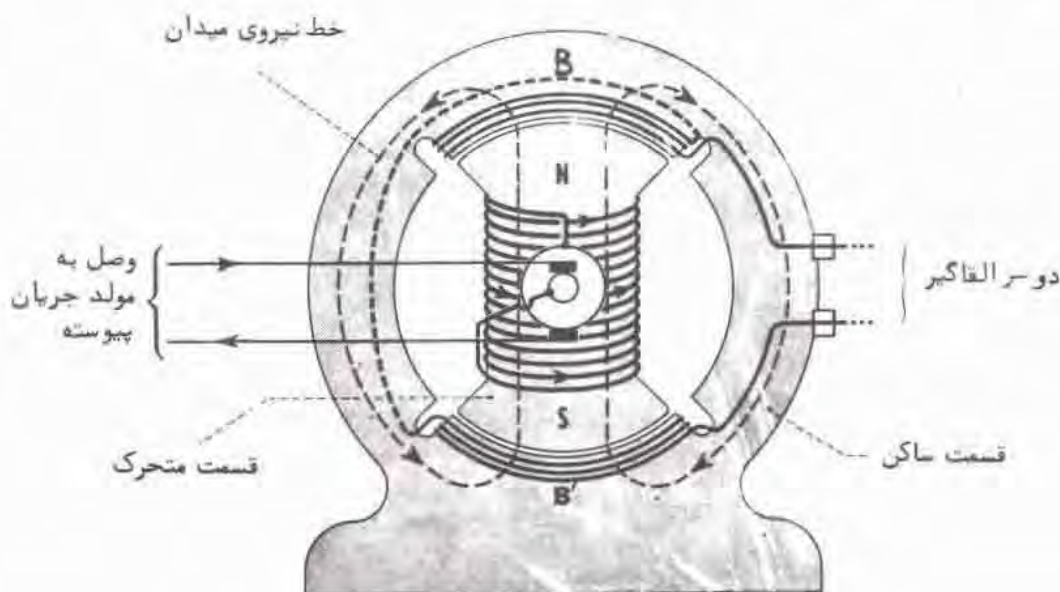
$$A = 0/10\,\text{m} \times 0/20\,\text{m} = 0/020\,\text{m}^2$$

خواهیم داشت:

$$E_m = 60 \times 0/50 \times 0/020 \times 188/4 \simeq 113/0\,\text{V}$$

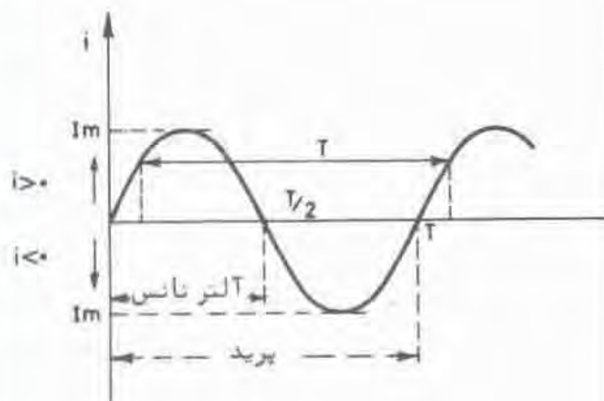
درمولدهای بزرگ جریان متناوب، یا «آلترناتورها»، سیم‌پیچها (یا به‌عبارت دیگر القاگیر) ثابت است. و قطبهای آهنربا (القاکن) درمقابل آنها می‌چرخد. القاکن یك آهنربای الکتریکی بسیار قوی است که دارای چندین جفت قطب N و S است. القاگیر نیز از چندین سیم پیچ تشکیل می‌شود که به طور متوالی (سری) به هم متصل هستند و جهت سیم پیچی آنها طوری است که نیروهای محرکه القاشده در آنها به‌هم اضافه می‌شوند. بدنه استوانه‌ای شکل آلترناتور (که سیم‌پیچها در شیارهای سطح داخلی آن پیچیده می‌شوند) از جنس آهن خالص است و مسیر خطوط نیروی میدان مغناطیسی نیز می‌باشد (به‌شکل ۱۳-۳ مراجعه کنید). چون قابلیت نفوذ مغناطیسی آهن خیلی زیاد است شارمغناطیسی را به آسانی و به‌مقدار زیاد ازخود عبورمی‌دهد ودرنتیجه نیروی محرکه القائی قوی تولید می‌شود. شکل ۱۳-۳ طرح ساده‌ای از یك آلترناتور دو قطبی را نشان می‌دهد.

شدت جریان متناوب- جریانی که توسط یك آلترناتور در یك مدارالکتریکی فرستاده می‌شود جریان متناوب است. درچنین مداری شدت جریان لحظه‌ای



شکل ۱۳-۳- طرح ساده‌ای از یك آلترناتور دوقطبی

قسمت متحرك (القاء کن) یك آهن‌ربای الکتریکی دو قطبی است که توسط یك مولد جریان پیوسته کمکی تغذیه می‌شود و به وسیله یك توربین بخار یا توربین آب، یا موتور دیزل می‌چرخد. قسمت ساکن استوانه‌ای است از آهن خالص ورقه ورقه، که درون شیارهای آن دو سیم پیچ B و 'B پیچیده‌شده است. خطوط نیروی میدان در هسته آهنی آهن ربای الکتریکی و بدنه آهنی آلترناتور مطابق شکل دور می‌زنند



شکل ۱۳-۴- نمودار تغییرات رابطه
$i = I_m \sin\omega t$

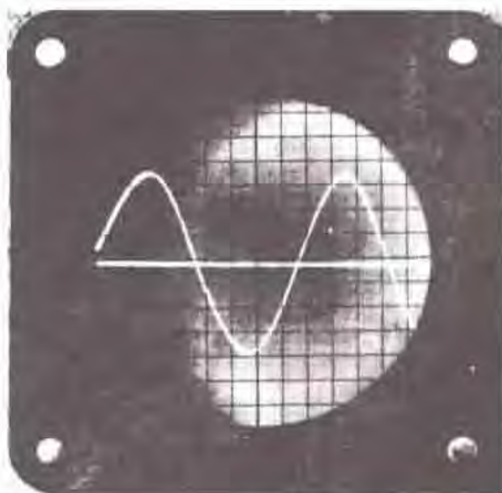
i، از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$i = I_m \sin\omega t \qquad (۴-۱۳)$$

که در آن I_m شدت جریان ماکزیموم وابسته به نیروی محرکه ماکزیموم است.

رابطه (۱۳-۴) نشان می‌دهد که شدت جریان به صورت یك تابع سینوسی بازمان تغییر می‌کند واین تغییرات در فواصل زمانی $T = \frac{2\pi}{\omega}$ (زمان تناوب) عیناً تکرار می‌شود. بدیهی است تواتر یا فرکانس این جریان (یعنی تعداددفعاتی که درهرثانیه‌تغییرات متناوب جریان تکرارمی‌شود) برابر $f = \frac{1}{T}$ است.

در شبکه برق سرتاسری‌کشورما، فرکانس جریان $f = 50Hz$ است. شکل (۱۳-۴) نمودار تغییرات i را برحسب زمان t نشان می‌دهد واگریك دستگاه نوسان نگار الکترونیکی به‌چنین جریانی وصل‌شود



شکل ۱۳-۵- نمودار تغییرات نیروی محرکه متناوب روی صفحه نوسان نگار الکترونیکی.

بر روی صفحه آن نمودار سینوسی ظاهر می‌شود (شکل ۱۳-۵).

شکل (۱۳-۴) نشان می‌دهد که جریان در هر پرید دوبار تغییر جهت می‌دهد ومدتی که طول می‌کشد تا جریان تغییر جهت دهد برابر $\frac{T}{2}$ (نصف پرید) است. این مدت را آلترنانس گویند بنابراین دربرق شهرکه پریدآن $\frac{1}{50}$ ثانیه است، هر آلترنانس $\frac{1}{100}$ ثانیه طول می‌کشد.

پرسش ۱۳-۱- با توجه به رابطه (۱۳-۴) و شکل(۱۳-۴) بگوئید درچه لحظاتی از یك‌پرید، شدت جریان در مدار ازلحاظ مقدار ماکزیموم ودر چه لحظاتی صفر است؟

اثرهای جریان متناوب

درسال‌پیش دیدیم که‌جریان‌الکتریسیته دارای سه اثرگرمائی و شیمیائی ومغناطیسی است. در این

جا یادآور می‌شویم که این سه اثر، خاص جریان پیوسته نیست بلکه در جریان متناوب هم ظاهر می‌شوند ولی تغییرات لحظه‌ای شدت جریان متناوب و تغییر جهت دادن دائمی آن به این اثرها کیفیت و خواص تازه‌ای می‌دهد که در جریان پیوسته دیده نمی‌شوند، به‌ویژه که جریان متناوب، چنان که خواهیم دید از مدار شامل خازن می‌گذرد درصورتی که جریان پیوسته نمی‌تواند ازچنین مداری بگذرد علاوه بر این جریان متناوب، برخلاف جریان پیوسته ثابت، می‌تواند در مدار خود یا درمدارهای مجاور این مدار، خود به‌خود نیروی محرکه القائی ایجاد کند. دراین‌جا پیش ازآن‌که به‌بحث در باره مدارهای جریان متناوب بپردازیم چند نتیجه از آثار سه‌گانه این جریان را یادآورمی‌شویم. بدیهی است در مطالعه تجربی این آثار، از برق شهرکه تواتر آن ۵۰ هرتز است استفاده می‌کنیم.

اثر شیمیایی جریان متناوب ـ درسال گذشته دیدیم وقتی که جریان پیوسته ازیك الکترولیت می‌گذرد یونهای مثبت موجود در الکترولیت به طرف کاتد و یونهای منفی موجود درآن به‌طرف آند کشیده می‌شوند و در الکترودها واکنشهای شیمیایی صورت می‌گیردکه معمولاً منجر به متصاعد شدن ئیدروژن یا رسوب یك فلز درکاتد می‌شود.

پرسش ۱۳-۲- جرم جسمی که درکاتد آزاد می‌شود با چه عواملی بستگی دارد؟

اگر جریان متناوب از الکترولیت بگذرد، الکترودی که دریك‌آلترنانس آند است در آلترنانس بعد کاتد می‌شود و برعکس، بنابراین:

ـ در الکترولیز آب اسیددار مخلوط قابل انفجاری از «$H_2 + \frac{1}{2} O_2$» در هردو الکترود ولتاژ متر حاصل می‌شود.

ـ درالکترولیز یك نمك، مانند سولفات‌مس، روی الکترودها مس‌نمی‌نشیند، زیرا دریك‌آلترنانس مقداری فلز روی الکترودی‌که کاتد است می‌نشیند و در آلترنانس بعد که این الکترود آند می‌شود همین مقدار فلز از روی‌آن برداشته می‌شود.

پرسش ۱۳-۳- چگونه می‌توان از جریان برق متناوب برای عمل‌الکترولیز استفاده کرد؟

اثر گرمایی جریان متناوب ـ می‌دانیم وقتی که جریان الکتریکی از یك هادی می‌گذرد قسمتی از انرژی الکتریکی یا همهٔ آن در هادی به انرژی گرمائی تبدیل می‌شود. مثلاً انرژی گرمائی که در اثر عبور یك جریان پیوسته به‌شدت I در یك هادی به‌مقاومت R در زمان معین t تولید می‌شود چنان که می‌دانیم طبق قانون ژول برابر است با:

$$W = RI^2t \qquad (۱۳-۵)$$

(W برحسب‌ژول، R برحسب‌اهم و I برحسب آمپر و t برحسب ثانیه است)

چون انرژی گرمائی که بدین ترتیب در یك هادی تولید می‌شود بستگی به‌جهت جریان ندارد اگراز هادی جریان‌متناوب‌بگذردمانند جریان‌پیوسته درآن‌گرما تولیدمی‌کند، به‌همین جهت‌تمام اسبابهای الکتریکی گرماده، هم باجریان‌متناوب وهم‌باجریان پیوسته کار می‌کنند ولی قانون ژول که به صورت رابطه (۱۳-۵) خلاصه شده است به‌شرطی درمورد جریان متناوب به کار می‌رود که I «شدت جریان مؤثر» باشد و این شدت بر اساس قانون ژول به این صورت تعریف می‌شود:

تعریف شدت جریان مؤثر در جریان متناوب- شدت جریان مؤثر در جریان متناوب برابر با شدت جریان پیوسته‌ای است که در یك مقاومت الکتریکی معین درهر پرید بهیك اندازه گرما تولیدکند.

باید یادآور شویم که آنچه برای یك پرید صادق است برای تعداد کاملی از پریدها هم صادق است وعملاً در مورد زمان غیرمشخص t نیزصدق می‌کند بهشرط‌آنکه زمان t نسبت بهپرید T بهقدر کفایت بزرگ باشد تا بتوان آن را محسوساً برابر مضرب کاملی از پرید درنظر گرفت.

شدت جریان مؤثر را چنانکه می‌دانیم‌می‌توان با آمپرسنج حرارتی اندازه گرفت[1]. این آمپرسنج از ابتدا به وسیله جریان پیوسته مدرج می‌شود. با آمپرسنج با قاب متحرك که در اندازه‌گیری جریان پیوسته به‌کارمی‌رود نمی‌توان مستقیماًشدت جریان متناوب را اندازه گرفت مگر اینکه جریان توسط یکسوکننده‌ای که در خود آمپرسنج قرار داده می‌شود یکسوگردد.

رابطهٔ بین شدت جریان مؤثر وشدت ماکزیمم- درنظر بگیریم که جریان متناوب $i = I_m \sin\omega t$ از یك هادی بهمقاومت R می‌گذرد. انرژی گرمائی که در زمان بسیارکوچك dt در این مقاومت‌تولید می‌شود طبق قانون ژول برابر است با[2]:

$$dW = RI^2dt$$

چون مدت‌هرپرید T (یاچند پرید کامل) رامی‌توان بهزمانهای بسیارکوچك dt تجزیه کرد، بنابراین انرژی گرمایی که در هرپرید T درمقاومت R تولید می‌شود مجموع انرژیهای جزئی خواهد بودکه هر جزء ازآنها در زمان‌بسیارکوچك dt تولیدمی‌شود. این مجموع را ازلحاظ محاسبات ریاضی به صورت زیر نمایش می‌دهند:

$$W = \int_0^T dW = \int_0^T Ri^2dt = R\int_0^T i^2dt$$

علامت $\int$ چنانکه‌در دروس‌ریاضی خود دیده‌اید معرف مجموع است و انتگرال نامیده می‌شود و صفر و T که پائین وبالای این علامت گذاشته‌شده است معرف‌حدود زمانی محاسبهٔ مجموع dWها می‌باشد.

از طرف دیگر بنا به‌تعریف شدت جریان مؤثر (که آن‌را به I_e نمایش‌می‌دهیم) این انرژی گرمایی W نیز برابر است با:

$$W = RI_e^2T$$

بنابراین:

$$RI_e^2T = R\int_0^T i^2dt$$

ویا

$$I_e^2 = \frac{\int_0^T i^2dt}{T} \quad (۶-۱۳)$$

معنی‌رابطه بالا این است‌که مجذور شدت‌جریان مؤثر برابر است با مقدار متوسط مجذورهای شدت جریان لحظه‌ای در یك پرید T.

چون $i = I_m \sin\omega t$ است رابطهٔ (۱۳-۶) را می‌توان چنین نوشت:

۱- به‌کتاب فیزیك سال‌سوم (بخش۴) مراجعه‌شود.

۲- دراین‌زمان‌کوچك dt می‌توان شدت‌جریان را ثابت فرض کرد.

$$I_e^2=\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \sin^2\omega t \,.\, dt$$
$$=\frac{I_m^2}{T}\int_0^T \sin^2\omega t\cdot dt$$

مقدار متوسط $\sin^2\omega t$ (همچنین $\cos^2\omega t$) در یك پرید (یعنی وقتی که ωt بین ۰ و 2π تغییر می‌کند) برابر $\frac{1}{2}$ است زیرا هردوی آنها در فواصل زمانی $\frac{T}{4}$ دارای اندازه‌های مساوی هستند و همچنین $\sin^2\omega t+\cos^2\omega t=1$ است . بنابراین

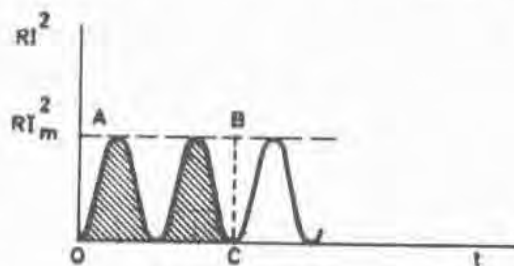
$$\int_0^T \sin^2\omega t \,.\, dt=\frac{T}{2}$$

در نتیجه: $$I_e^2=\frac{I_m^2}{2}$$

ویا (۱۳-۷)
$$\boxed{I_e=\frac{I_m}{\sqrt{2}}\simeq 0/707 I_m}$$

رابطه (۱۳-۷) را می‌توان به روش استدلالی زیر نیز بدست آورد:

نمودار تغییرات Ri^2 را برحسب زمان t رسم می‌کنیم، این نمودار مطابق شکل (۱۳-۶) است. اندازه انرژی گرمائی که یك جریان پیوسته باشدت ثابتی برابر I_m، درمدت یك پرید T تولید می‌کند برابر



شکل ۱۳-۶

$$Ri^2=RI_m^2\sin^2\omega t$$

مساحت مستطیل OABC است، ولی این انرژی گرمائی برای جریان متناوبی که شدت ماکزیمم آن I_m است برابر سطح محصور بین منحنی‌ومحور ot (یعنی سطح‌هاشورخورده) می‌باشد و چنان که مشاهده می‌شود این سطح نصف سطح مستطیل OABC است.

در نتیجه: $$RI_e^2=\frac{RI_m^2}{2}$$

ویا $$I_e=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

نیروی محرکه مؤثر ـ با محاسبه و استدلالی نظیر آن‌چه دربالا بیان شدنتیجه می‌شودکه بین‌نیروهای محرکه مؤثر و ماکزیموم نیز رابطه زیر برقرار است:

$$\boxed{E_e=\frac{E_m}{\sqrt{2}}\approx 0/707E_m} \qquad (۱۳-۸)$$

مثلا اگر نیروی محرکه مؤثر برق شهر ۲۲۰ ولت باشد نیروی محرکه ماکزیموم آن برابر است با:

$$E_m=E_e\sqrt{2}=220\times\sqrt{2}\simeq 220/0 \times 1/414\approx 311/0V$$

اثرهای مغناطیسی جریان متناوب ـ وقتی‌که جریان متناوب $i=I_m\sin\omega t$ از یك مدار می‌گذرد در اطراف آن القای مغناطیسی $\vec{B}$ به‌وجود می‌آید که اندازه وجهت آن مانند خود جریان به‌طور سینوسی تغییر می‌کند. مثلا القای مغناطیسی در وسط یك سولنوئیدکه n دور سیم پیچ در واحد طول (یعنی درهرمتر) دارد. درهرلحظه t برابر است با:

$$B = 4\pi \times 10^{-7} ni$$

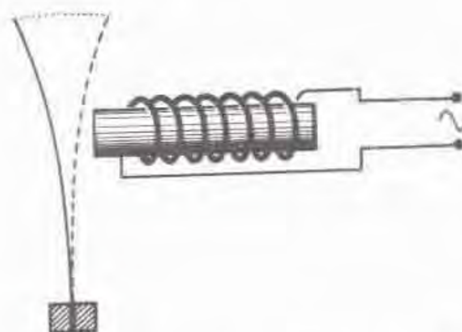
و اندازه ماکزیمم آن برابر است با:

$$B_m = 4\pi \times 10^{-7} nI_m$$

اگـر هسته‌ای از آهن خالص درون سولنوئید قرار داده شود، درجهت‌میدان مغناطیسی حاصل از جریان آهن‌ربا می‌شود وقطبهای آن مـرتباً همراه با جهت جریان عوض می‌شود. مثلاً اگر تواتـر جریان ۵۰ هرتز باشد هریك از دو سر هسته آهنی در یك ثانیه ۵۰ بار قطب N و ۵۰ بـار قطب S می‌شود. بدیهی است درلحظه‌ای یك سرهسته آهنی قطب N است سر دیگر آن قطب S می‌باشد.

اگر جلویکی ازاین‌قطبها مطابق شکل(۱۳–۷) تیغهٔ فـولادی فنری نصب شود و طول آن طوری تنظیم‌گردد که تواتر ویژهٔ آن با تواتر ضربه‌های متناوبی‌که توسط آهن‌ربا دریافت می‌کند برابرباشد تیغه بنابه‌خاصیت رزونانس به‌شدت مرتعش می‌شود و بسته به‌جنس این تیغه دو حالت اتفاق مـی‌افتد:

۱– اگرتیغه جلو آهن ربـا از جنس فولاد نرم (یعنی فولادی‌که خاصیت آهن‌ربایی‌آن به‌سرعت از بین‌می‌رود) باشد در هرآلترنانس جذب قطب آهن‌ربا



شکل ۱۳–۷– ارتعاش یك تیغه فولادی بوسیله آهن‌ربای الکتریکی‌که ازآن جریان متناوب می‌گذرد.



شکل ۱۳–۸– نوسان سنج تیغه‌ای

می‌شود و بنابراین تواترآن درحال رزونانس برابر تعداد آلترنانسهای جریان در ثانیه (یعنی دو برابر فرکانس جریان) است . از این خاصیت در دستگاه نوسان‌سنج برای کنترل تواترجریـانهای متناوب استفاده می‌شود . شکل (۱۳–۸) درون یك نوسان‌ـ سنج تیغه‌ای راکه دارای یـازده تیغه مرتعش است نشان می‌دهد. وقتی‌که نوسان‌سنج به‌جریان متناوب متصل می‌شود فقط‌تیغه‌ای مرتعش می‌شود وحالت رزونانس پیدا می‌کندکه تواتر آن درست دو برابر تواتر جریان برق باشد.

۲– اگـر تیغه جلوآهن ربـا از جنس فولادی باشدکه به‌شدت آهن‌ربا می‌شود، (یا به‌عبارت‌دیگر خود یك آهن‌ربـا باشد) در آلترنـانسهای متوالی

متناوباً جذب و دفع می‌گردد. بنابراین تواتر ارتعاشات آن برابر تواتر جریان خواهد بود.

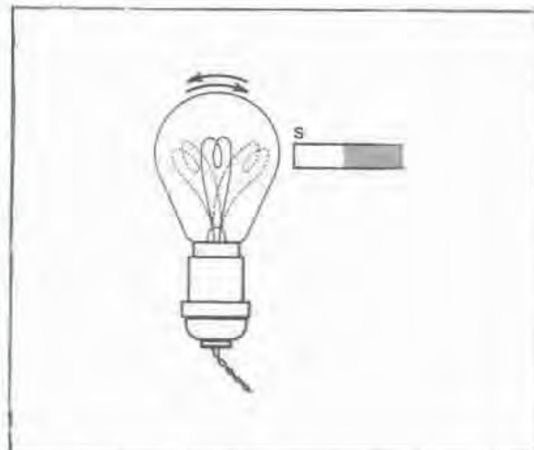
اثرمیدان مغناطیسی ثابت برجریان متناوبـ دیدیم وقتی ازیك قطعه‌سیم مسی که دریك‌میدان‌مغناطیسی قرار دارد، جریان الکتریسیته بگذرد برآن نیرویی به‌نام نیروی الکترومانیتیك وارد می‌شودکه سبب حرکت سیم درآن میدان می‌گردد. چون اندازه این نیرو متناسب با شدت جریان الکتریکی است اگر جریانی که از سیم می‌گذرد متناوب باشد نیروی الکترومانیتیك وارد بر سیم نیز متناوب خواهد بود. بنابراین برقسمتی از مدار جریان متناوب‌که در یك میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد، هنگام عبور جریان، نیرویی وارد می‌شود که جهت آن در هر آلترنانس تغییر می‌کند، اگر این قسمت از مدار بتواند حرکت‌کند، در اطراف وضع تعادل خود با تواتری‌که برابر تواتر جریان است نوسان خواهد کرد. این کیفیت را با آزمایشی که درشکل (۱۳-۹) دیده می‌شود مـی‌توان نشان داد: هرگاه قطب‌یك آهن‌ربا را به رشته بلند و قابل ارتعاش درون یك لامپ الکتریکی که با برق شهر روشن شده است نزدیك‌کنیم رشته ملتهب با تواتری‌که برابر تواتر جریان برق است مرتعش می‌شود.

پرسش ۱۳-۴ - با آشنائی که درباره‌نیروی الکترومانیتیك دارید، بگوئید اندازه آن وقتی که جریان متناوب است ازچه‌رابطه‌ای حساب می‌شود؟

اثرخودالقائی

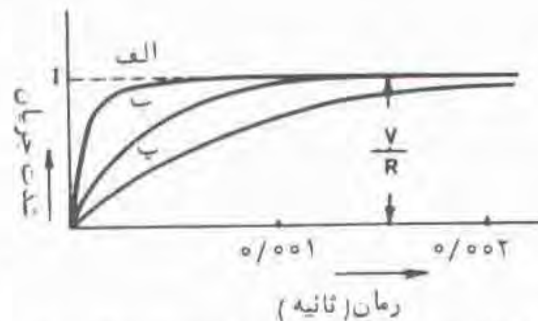
هرگاه دوسر یك سیم مسی دراز ومستقیم را به دوقطب یك باتری وصل‌کنیم، شدت جریان در مدار حاصل به‌سرعت بالا می‌رود در حدی‌که قانون اهم مشخص می‌کند ثابت میماند (شکل ۱۳-۱۰ الف) اگر سیم را به صورت یك سیم پیچ در آوریم و با دو سر باتری وصل کنیم شدت جریان در آن کندتر بالا می‌رود (نمودار ب).

چنانچه یك هسته آهنی درون سیم پیچ قرار





شکل ۱۳-۹- با نزدیك‌کردن یکی ازقطبهای یك آهن‌ربا به‌رشته بلند و قابل ارتعاش یك لامپ کـه بوسیله برق شهر روشن شده است، رشته مرتعش می‌شود.



شکل ۱۳-۱۰- نمودار تغییرات شدت جریان نسبت به زمان در یك سیم مسی در حالتی که:
الف— سیم راست است.
ب— سیم به‌صورت سیم‌پیچ است.
پ— سیم به‌صورت یك سیم‌پیچ با هسته آهنی است.

دهیم تا به‌صورت یك آهن‌ربای الکتریکی درآید و دو سر آن را به باتری وصل نمائیم شدت جریان مطابق نمودار پ بازهم کندتر بالا خواهد رفت.

علت این که در دو حالت اخیر شدت جریان دیرتر از حالت نخست به‌حد خود می‌رسد این است که درسیم‌پیچ درلحظهٔ اتصال‌به‌باتری نیروی‌محرکه القائی ایجاد می‌شود که با بالا رفتن شدت جریان مخالفت می‌کند به همین جهت آن را «نیروی ضد محرکه القائی» نیز مـی‌نامند. اندازه این نیرو در حالتی که سیم مستقیم است بسیارناچیزمی‌باشد ولی اندازه‌آن در یك سیم پیچ،مخصوصاً اگرهسته‌آهنی داشته باشد زیاد است.

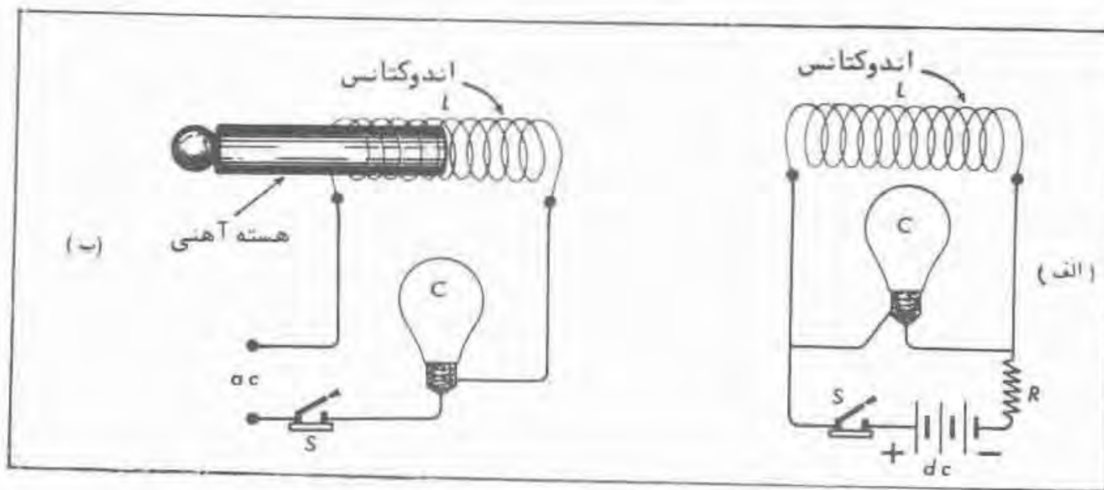
علت پیدایش خود بـه خود چنین نیروی ضد محرکه القائی را می‌توان چنین بیان کرد:

وقتی‌که از سیم‌پیچ جریان i می گذرد درون آن میدان مغناطیسی به‌شدت B به‌وجود می‌آید که با i متناسب است. این میدان سبب می‌شود که شار مغناطیسی φ از درون حلقه‌های سیم‌پیچ بگذرد که متناسب با B و در نتیجه با i متناسب است . در

لحظه‌ای که سیم‌پیچ به باتری متصل می‌شود شدت جریان در مدت کوتاهی ازصفر بـه مقدار ماکزیمم خود می‌رسد (شکل۱۳-۱۰) .

تغییر جریان در این مدت کوتاه سبب تغییر شار مغناطیسی درون سیم‌پیچ می‌شود و در نتیجه، خود به‌خود نیروی محرکـه القائی در سیم‌پیچ بـه وجود می‌آید که طبق قانون لنز جهت‌آن مخالف جهت نیروی محرکه اصلی است. به‌همین جهت این پدیده را «خود القائی» ونیروی محرکـه حاصل از آن‌را «نیروی محرکه خودالقائی»نامیده‌اند. بدیهی است اگر شدت جریان به‌طور مداوم تغییر کند مثلا از سیم پیچ جریان متناوب بگذرد، نیروی محرکه خود القائی نیز به‌طور مداوم ایجاد خواهد شد.

در شکل ۱۳-۱۱ دو آزمایش ساده یکی با جریان مستقیم و دیگری بـا جریان متناوب برای نشان دادن اثر خود القائی طرح ریزی شده است. در شکل الف (شبیه‌آن را درسال پیش نیز دیده‌اید) یك سیم‌پیچ که تعداد حلقه‌های آن خیلی زیاداست با یك لامپ به‌طور موازی بسته شده و به‌دوسریك باتری ۱۲۰ ولت متصل است. همین که کلید S بسته می‌شود لامپ چند لحظه پـرنور می گـردد و سپس حالت عادی خود را پیدا می کند و در لحظه‌ای کـه کلید باز می شود، لامپ درچند لحظه دوباره پرنور می‌شود سپس خاموش می گردد. علت این است کـه در هنگام بستن کلید، نیروی ضد محرکه خودالقائی تولید شده درسیم‌پیچ مانع‌می‌شود که جریان‌به‌سرعت در سیم‌پیچ برقرار شود و اثر خودالقائی آن مانند یك مقاومت زیاد رفتارمی‌کندکه سبب می‌شودبیشتر جریان از لامپ بگذرد. پس از چند لحظه جریان‌در مدار به‌حد ثابت‌خود می‌رسد واین اثر ازبین‌می‌رود



شکل ۱۳-۱۱- آزمایش برای نشان دادن اثر خودالقائی

و جریان هم از لامپ وهم از سیم‌پیچ می‌گذرد و روشنائی لامپ کم می‌شود.

لحظه‌ای که کلید باز می‌شود شدت میدان مغناطیسی درون سیم‌پیچ یک‌باره صفر می‌شود وشار مغناطیسی به‌سرعت تغییر می‌کند. درنتیجه این‌تغییر شار، جریان خودالقائی شدیدی به‌وجود می‌آید و همین جریان است که لامپ را چند لحظه پرنور می‌کند.

در آزمایش ب از مداری‌که شامل یک‌سیم پیچ و یک لامپ است جریان متناوب‌می‌گذرد وقتی که هسته‌آهنی‌درون سیم‌پیچ‌نباشد لامپ پرنوراست. اگر هسته آهنی را به تدریج داخل سیم پیچ کنیم روشنائی لامپ به تدریج کاسته می‌شود. علت این است‌که وجود هسته آهنی در سیم‌پیچ سبب می‌شود که‌تغییرات‌شدت‌میدان مغناطیسی ودر نتیجه تغییرات شارمغناطیسی که از درون سیم پیچ‌می‌گذرد شدیدتر شود ونیروی ضدمحرکه القائی بیشتری تولیدگردد وچون جریان خودالقائی همواره در خلاف جهت جریان اصلی است این جریان خودالقائی‌نمی‌گذارد که شدت جریان اصلی در مدار زیاد بالا رود.

پرسش ۱۳-۵ - شدت جریان متناوب راهم به وسیله سیم‌پیچ خود القا و هم به وسیله رئوستا می‌توان در یک مدار کاهش داد. به‌نظر شماکدام‌یک از این دو وسیله برای این منظور بهتر است؟ چرا؟

محاسبهٔ نیروی محرکه خود القائی- ضریب خود القائی - گفتیم‌وقتی که ازیک‌مدار جریان i می‌گذرد در اطراف این مدار القای مغناطیسی B به وجود می‌آید و این القای مغناطیسی سبب می‌شودکه شار مغناطیسی از درون مدار بگذردکه با شدت جریان i متناسب‌است. این تناسب را می‌توانیم به‌صورت رابطه زیر بنویسیم:

$$\varphi = Li \quad (۹-۱۳)$$

L ضریب ثابتی است که بستگی به ساختمان مدار دارد و «اندوکتانس» یا «ضریب خود القائی» مدار

نامیده می‌شود.

اگر شدت جریان i تغییر کند شار مغناطیسی φ نیز تغییر می‌کند و این تغییر شار درمدار نیروی محرکه خود القائی به‌وجود می‌آورد که از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -L\frac{di}{dt} \qquad (۱۰-۱۳)$$

واحد ضریب خود القائی (یا اندوکتانس) L در دستگاه بین‌المللی واحدها «هانری»[۲] (با علامت اختصاری H) نام دارد و از رابطه (۱۳-۱۰) چنین تعریف می‌شود:

هانری، اندوکتانس (یا ضریب خود القائی) مداری است که اگر شدت جریان در آن به‌اندازه یك آمپر درمدت یك ثانیه به‌طور یکنواخت تغییرکند در مدار نیروی محرکه خودالقائی برابر یك ولت تولید شود.

انرژی الکتریکی ذخیره شده در یك سیم پیچـ هنگامی که در یك سیم‌پیچ جریان الکتریکی برقرار می‌شود، یعنی در مدتی که شدت جریان از صفر به مقدار ثابت I می‌رسد، انرژی الکتریکی که توسط مولد به‌مدار داده می‌شود کاملا به‌مصرف نمی‌رسد بلکه‌قسمتی از این انرژی درمیدان مغناطیسی سیم‌پیچ ذخیره می‌گردد. به‌همین جهت این انرژی را «انرژی الکترومانیتیکی جریان» نیزمی‌نامندمحاسبه نشان می‌دهد که انرژی الکترومانیتیکی جریان، متناسب با اندوکتانس مدار و مجذور شدت جریان است یعنی:

$$W = \frac{۱}{۲}LI^{۲} \qquad (۱۱-۱۳)$$

که درآن I برحسب آمپر و L برحسب هانری و W برحسب ژول است.

در موقع قطع مدار، در جرقه‌ای که در محل اتصال کلید جستن می‌کند ممکن است قسمتی ازاین انرژی (کم وبیش قابل توجه) به‌مصرف برسد.

یادآوریـ انرژی‌الکترومانیتیکی جریان‌خاص سیم‌پیچ نیست بلکه هرمداری‌که دارای اندوکتانس باشد مقداری از انـرژی الکتریکـی را در میدان مغناطیسی اطراف خود ذخیره می‌کند.

اختلاف پتانسیل لحظه‌ای و اختلاف پتانسیل مؤثرـ می‌دانیم‌وقتی که ازیك‌مدار جریان‌الکتریسیته‌می‌گذرد بین دو سر هریك از اجزاء مـدار اختلاف پتانسیل الکتریکی برقرار می‌شود.

اگرجریانی که ازمدارمی‌گذرد متناوب وشدت

۱ـ اندوکتانس L چنان که دربالا بیان شد بستگی به ساختمان مدار دارد و بـرای یك سیم‌پیچ از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$L = K\mu_{\circ}\frac{N^{۲}A}{l}$$

که درآن N عده حلقه‌های سیم‌پیچ و A سطح‌مقطع داخل سیم‌پیچ برحسب متر مربع و l طـول سیم‌پیچ برحسب متر و $\mu_{\circ}$ ضریب قابلیت نفوذ مغناطیسی خلأ (یاهوا) و K ضریب‌قابلیت‌نفوذ مغناطیسی‌هسته درون‌سیم‌پیچ است.

۲ـ Henry، به‌افتخار Joseph Henry (۱۸۷۸-۱۷۹۷ م) فیزیك‌دان امریکائی.

لحظه‌ای آن به صورت تابع سینوسی $i = I_m \sin\omega t$ باشد اختلاف پتانسیل نیز تابع سینوسی با همان پریود شدت جریان است ولی معمولاً بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل یك اختلاف فاز φ[1] وجود دارد. بنابراین معادلـه اختلاف پتانسیل لحظه‌ای بین دو نقطه مورد نظر ازمدار به‌صورت زیرنوشته‌می‌شود:

$$v = V_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (۱۲-۱۳)$$

ـ اگر $\varphi > 0$ باشدمی گوئیم اختلاف‌پتانسیل نسبت به‌شدت جریان جلو است.

ـ اگر $\varphi < 0$ باشدمی گوئیم اختلاف‌پتانسیل نسبت به‌شدت جریان عقب است.

ـ اگر $\varphi = 0$ باشد می گوئیم اختلاف‌پتانسیل و شدت جریان هم فاز هستند.

اختلاف‌فاز φ و نسبت $\frac{V_m}{I_m}$ و هم‌چنین‌اختلاف پتانسیل مؤثر دوسریك مدار جریان‌متناوب بستگی به ویژگیهای اجزای مداردارد. (این بستگیها رادر صفحات بعد خواهیم دید).

اختلاف پتانسیل مؤثر یعنی اختلاف پتانسیلی که مستقیماً به‌وسیله ولت‌سنج اندازه‌گرفته می‌شود و بین اختلاف پتانسیل مؤثـر و اختلاف پتانسیل ماکزیموم رابطه زیر برقرار است:

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (۱۳-۱۳)$$

باید توجه داشت کـه مقاومت الکتریکـی و خازن وخودالقاءهریك به‌تنهائی یا باهم نقش‌مؤثری در مدارجریان متناوب دارند. هراسباب الکتریکی که با جریان متناوب کار می‌کند معمولاً در مقابل عبور جریان، مقاومتهائی به‌صورتهای زیر از خود نشان می‌دهد.

۱ـ مقاومت معمولی (یا رزیستانس) که در مقابل جریان متناوب و جریان پیوسته یکسان‌ظاهر می‌شود.

۲ـ مقاومت‌ظاهری‌حاصل ازپدیده خودالقائی (اندوکتانس) که خاص جریـان متغیر یـا متناوب است.

۳ـ مقاومت ظاهری حاصل از وجود خازن در مدار الکتریکی اسباب (کاپاسیتانس)که درمقابل عبور جریان پیوسته بینهایت‌است زیرا جریان‌پیوسته از خازن نمی‌تواند بگذرد.

اگر اثرهـای خود القائی (انـدوکتانس) و ظرفیت (کاپاسیتانس) مدارنسبت‌به‌مقاومت‌الکتریکی آن ناچیز باشد مدار درحکم یك مقاومت ساده‌است و برای محاسبه شدت جریان می‌توان قانون اهم را به‌کار برد. ولی اگرمدارشامل خود القاء[2]یا خازن باشد بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل اختلاف فاز به‌وجود می‌آید و برای محاسبه شدت جریان، دیگر نمی‌توان قانون اهم را به‌صورت معمولی‌آن به‌کار برد. اینك‌هریك ازحالات مختلف را جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱ـ حالت ساده‌ای‌کـه مدار فقط شامل مقاومت است ـ در نظر بگیریم کـه به دو سر یك مقاومت

۱ـ به‌بخش ۱۱ مراجعه شود.

۲ـ خود القاء را سلف‌اندوکسیون (self Induction) یا به‌اختصار سلف نیز می‌نامند.

این خود القا بگذرد برابر است با:

$$I_m = \frac{V_m}{L\omega} \qquad (۱۷-۱۳)$$

از مقایسه این رابطه با رابطه معمولی قانون اهم نتیجه می‌شودکه خود القا (یا سلف) در مقابل عبور جریان‌متناوب یک‌مقاومت ظاهری $L\omega$ ایجاد می‌کند که هرچه اندوکتانس L بیشتر و یا فرکانس جریان زیادتر باشد اندازه این مقاومت بیشتر است. این‌مقاومت‌ظاهری‌را معمولاً به X_L نمایش‌می‌دهند و ماآن را «مقاومت القائی»[1] می‌نامیم. بنابراین:

$$X_L = L\omega = ۲\pi f L \qquad (۱۸-۱۳)$$

که در آن L برحسب هانری و f برحسب هرتز (یا ω برحسب رادیان برثانیه) و X_L برحسب اهم است.

مثال ـ مطلوبست مقاومت القائی سولنوئیدی که ضریب خود القائی (اندوکتانس) آن $L = ۲/۰ \times ۱۰^{-۳}H$ است و از آن برق شهر با فرکانس ۵۰ هرتز می‌گذرد.

ـ داریم:

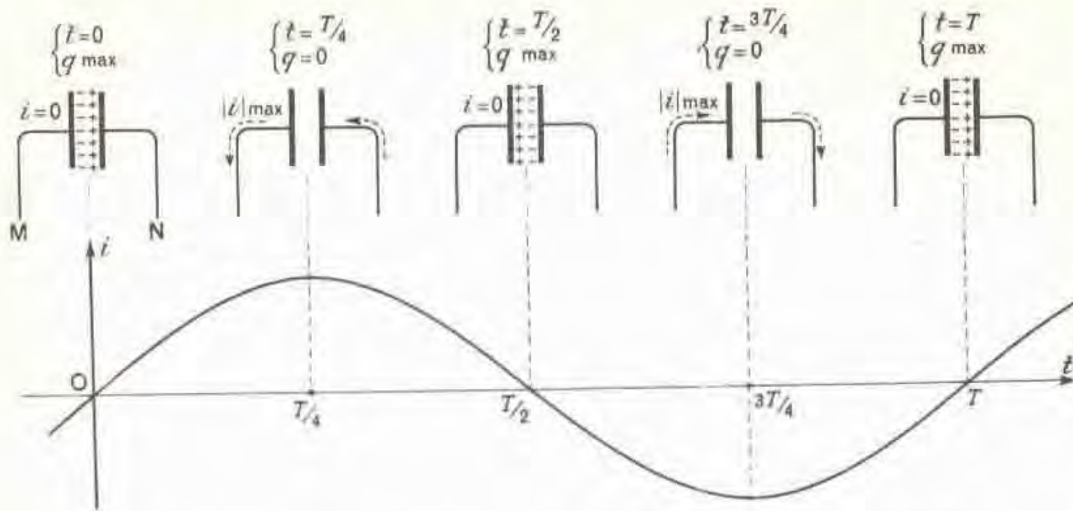
$$X_L = ۲\pi f L = ۲ \times ۳/۱۴ \times ۵۰ \times ۲/۰ \times ۱۰^{-۳} \simeq ۰/۶۳\Omega$$

پرسش ۱۳-۶ـ بین اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر در یک خودالقا، چه رابطه‌ای برقرار است؟

۳ـ حالتی که مدار فقط شامل خازن استـ اگر دو صفحه یک خازن را به قطب یک باتری جریان پیوسته وصل کنیم پس از پرشدن خازن جریان در مدار صفر می‌شود. به‌عبارت دیگر خازن در مدار جریان پیوسته در حکم یک مقاومت بینهایت است که مانع عبور جریان می‌شود. ولی اگر بین دو صفحه خازن اختلاف پتانسیل متناوبی بسته شود رفتار خازن بکلی متفاوت خواهد بود وخازن مانع عبور جریان از مدار نمی‌شود؛ وقتی جهت اختلاف پتانسیل دو سر خازن عوض می‌شود جهت جریان در مدار خازن نیز عوض می‌شود. بنابراین جریان در مدار خازن در اثر پرشدن و خالی‌شدن متناوب خازن برقرار می‌شود وتواتر جریان در مدار خازن برابر تواتر جریان اصلی است (شکل ۱۳-۱۴). و در این عمل خازن در مقابل جریان یک مقاومت ظاهری ایجاد می‌کندکه بستگی به‌ظرفیت خازن و فرکانس جریان‌دارد وهرچه ظرفیت خازن یافرکانس جریان بزرگتر باشد این مقاومت کوچکتر است. ولی خازن با مقاومت معمولی این تفاوت را دارد که درخازن انرژی الکتریکی مصرف نمی‌شود بلکه به‌صورت انرژی الکتروستاتیکی $\frac{۱}{۲}CV^۲$ ذخیره‌می‌گردد،درصورتی‌که دریک‌مقاومت، انرژی‌الکتریکی به‌صورت گرما تلف می‌شود.

برای محاسبهٔ مقاومت ظاهری خازن، درنظر بگیریم که بین دو صفحه خازن اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است‌که اندازه آن دریک‌لحظه t برابر v است. بار الکتریکی q که در این لحظه

۱ـ اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی Inductive Reactance است.



شکل ۱۳-۱۴- جریان متناوب در مدار خازن در اثر پر شدن و خالی‌شدن متوالی خازن برقرار می‌شود.

روی هر صفحه خازن موجود است برابر خواهد بود با:

$$q = Cv \qquad (۱۹-۱۳)$$

که درآن C ظرفیت خازن است.

چون اختلاف پتانسیل ثابت نیست پس از گذشت زمان بینهایت کوچك dt (یعنی بین دو لحظهٔ t و t+dt) بار الکتریکی به‌اندازه dq تغییر می‌کند وشدت جریان حاصل از این تغییر بار از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dv}{dt}$$

یا:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i}{C}$$

اگر معادله شدت جریان‌را به‌صورت: $i = I_m \sin\omega t$ در نظر بگیریم خواهیم داشت

$$\frac{dv}{dt} = \frac{I_m}{C}\sin\omega t$$

$\frac{dv}{dt}$ مشتق اختلاف پتانسیل v نسبت به زمان t است، بنابراین برای به‌دست‌آوردن v کافی است تابع اولیه رابطه بالارا حساب‌کنیم. یعنی:

$$v = -\frac{I_m}{C\omega}\cos\omega t = \frac{I_m}{C\omega}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) =$$

$$= V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \qquad (۲۰-۱۳)$$

(زیرا تابع اولیه $\sin\omega t$ برابر $-\frac{1}{\omega}\cos\omega t$ است.)

این رابطه نشان می‌دهد که اولاً بین شدت جریان i واختلاف پتانسیل v اختلاف فاز $-\frac{\pi}{2}$ موجود است و پتانسیل نسبت به شدت عقب است به عبارت دیگر شدت جریان نسبت به اختلاف پتانسیل جلو است. یعنی شدت جریان همواره به اندازه زمان $\frac{T}{4}$ زودتر از اختلاف پتانسیل، به مقدار ماکزیمم یا صفر می‌رسد (به‌شکل ۱۳-۱۸پ

مراجعه کنید). ثانیا بین اختلاف پتانسیل، ماکزیمم V_m وشدت جریان ماکزیمم I_m رابطه زیر برقرار است:

$$V_m = \frac{I_m}{C\omega}$$

یا:

$$\boxed{I_m = C\omega \cdot V_m = \frac{V_m}{\frac{1}{C\omega}}} \quad (۲۱-۱۳)$$

رابطه بالا را به این جهت به صورت:

$I_m = \dfrac{V_m}{\frac{1}{C\omega}}$ نوشته‌ایم که بتوانیم آن را با رابطه اساسی اهم $(I_m = \dfrac{V_m}{R})$ مقایسه کنیم. این رابطه نشان می‌دهد که خازن درمقابل عبور جریان متناوب از مدار، یك مقاومت ظاهری از خود نشان می‌دهد که اندازه آن برابر $\dfrac{1}{C\omega}$ است. این مقاومت ظاهری را معمولاً به X_c نمایش می‌دهند و ما آن را «مقاومت ظرفیتی[1]» می‌نامیم، بنابراین:

$$\boxed{X_c = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi fC}} \quad (۲۲-۱۳)$$

که درآن C برحسب فاراد و f برحسب هرتز و X_c برحسب اهم است. بدیهی است بین اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر درمدار خازن رابطهٔ: $I_e = \dfrac{V_e}{X_c}$ برقرار است

مثال- هرگاه دوسر خازنی به‌ظرفیت ۲/۰ میکرو‌فاراد را با سیمهای بدون مقاومت به‌برق‌شهر وصل کنیم اولاً چه‌مقاومت ظرفیتی در برابر این جریان ایجاد خواهد کرد؟ ثانیاً اگر اختلاف پتانسیل دوسر آن ۲۲۰ ولت باشد چه شدت جریانی از مدار آن خواهد گذشت؟

- اولاً داریم:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

به‌ازاء $C = 2\mu F = 2\times 10^{-6}F$ و $f = 50Hz$ خواهیم داشت:

$$X_c = \frac{1}{2\times 3/14\times 50\times 2\times 10^{-6}} = \frac{10^4}{2\times 3/14} = \frac{5\times 10^3}{3/14}\Omega$$

یا:

$$X_c \simeq 1/6\times 10^3\Omega$$

ثانیاً:

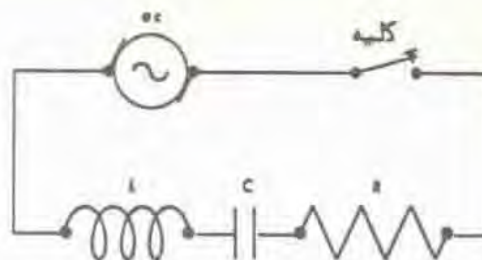
$$I_e = \frac{V_e}{X_c} = 2\pi fC\times V_e$$

یا:

$$I_e = 2\times 3/14\times 50\times 2/0\times 10^{-6}\times 220 \simeq 0/14A$$

۴- مدار شامل مقاومت و سلف و خازن است- حالت کلی- اینك مداری در نظر بگیریم شامل مقاومت R وخازن C وسلف L که به‌طورمتوالی بههم بسته شده‌اند (شکل ۱۳-۱۵) و بین دو سر مدار

۱- اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی Capacitive Reactance است.



شکل ۱۳-۱۵- مدار جریان متناوب شامل مقاومت و خازن و سلف که به‌طورمتوالی بهم بسته شده‌اند.

اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است. اگر اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار V_e باشد، شدت جریان مؤثر درمدار از رابطهٔ زیر حساب می‌شود[1]:

$$I_e = \frac{V_e}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}} \quad (۱۳-۲۳)$$

دراین رابطه $\sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}$ مقاومت ظاهری کل مدار است که «امپدانس[2]» مدار نامیده می‌شود ومعمولاً آن‌را به Z نمایش می‌دهند و واحد آن اهم است. بنابراین:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2} \quad (۱۳-۲۴)$$

و

$$I_e = \frac{V_e}{Z} \quad (۱۳-۲۵)$$

این رابطه نظیر فرمول اهم یعنی $I = \frac{V}{R}$ است که به‌جای R، مقاومت ظاهری Z قرار گرفته است. $X = X_L - X_c$ را رآکتانس مدار گویند.

یادآوری- اگر سلف، خود نیز دارای مقاومت کوچکی باشد، مقاومت آن بامقاومت R جمع می‌شود. دراین‌صورت R مقاومت کل مدار خواهدبود.

روش ترسیم برای تعیین Z- روابط بین R و X_L و X_c و Z را می‌توان از راه ترسیم مانند روش برداری نیز نشان داد (شکل ۱۳-۱۶): مقاومت R را مطابق شکل، با یك بردارکه طول آن متناسب با اندازه R است با انتخاب یك‌واحد مناسب روی محور افقی ox نمایش می‌دهیم، سپس رآکتانسهای X_L و X_c را با همان واحد به‌وسیله دو بردار در خلاف جهت یك‌دیگر روی محور oy عمودبر ox نمایش می‌دهیم در این صورت اندازه Z برابر طول برآیند سه‌بردار R و X_L و X_c خواهد بود.

اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل- وجود سلف و خازن در مدار جریان متناوب سبب می‌شودکه‌بین شدت‌جریان‌واختلاف پتانسیل‌اختلاف فازی‌به‌وجودآید. اندازه‌این‌اختلاف‌فاز، به‌طوری‌که از شکل (۱۳-۱۶) نیز استنباط می‌شود، از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$tg\varphi = \frac{X_L - X_c}{R} \quad (۱۳-۲۶)$$

اگر $X_L > X_c$ باشد $\varphi > 0$ است، در

۱- با محاسباتی نظیر آن‌چه‌گذشت می‌توان به‌آسانی این رابطه را به‌دست آورد.

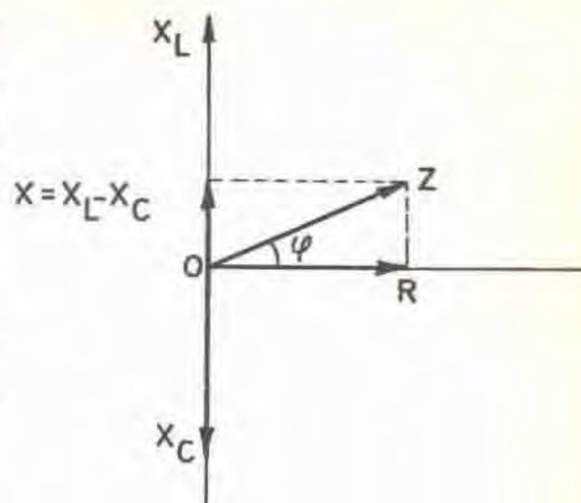
۲- Impedance

حالت رزونانس- اگر $X_L = X_c$ باشد $\varphi = 0$ است. دراین حالت امپدانس Z کمترین مقدار خود را دارد و برابر R است. در نتیجه شدت جریان در مدار به بیشترین مقدارخود می‌رسد که مقدار مؤثر آن‌برابر با $I_e = \frac{V_e}{R}$ است، دراین‌صورت می‌گویند مدار در حال رزونانس یا تشدید است. دراین‌حالت خواهیم داشت:

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

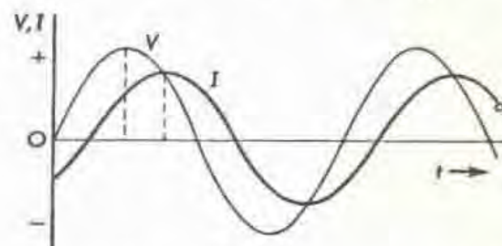
یا:

$$\boxed{LC\omega^2 = 1} \qquad (27-13)$$



شکل (۱۳-۱۶)- روش ترسیم برای تعیین امپدانس مدار جریان متناوب.

نتیجه اختلاف‌پتانسیل v نسبت به‌شدت i جلواست. اگر $X_L < X_c$ باشد $\varphi < 0$ است و اختلاف پتانسیل نسبت به‌شدت جریـان عقب است. شکل (۱۳-۱۷) حالتی را نشان می‌دهد که i نسبت به v به‌اندازه $\frac{\pi}{4}$ عقب‌است. به‌عبارت‌دیگر شدت‌جریان به‌اندازه $\frac{1}{8}$ پرید از ولتاژ عقب است.



شکل ۱۳-۱۷-شدت جریان به‌اندازه $\frac{\pi}{4}$ نسبت به‌اختلاف پتانسیل عقب‌است.

توان درمدار جریان متناوب- ضریب توان- می‌دانیم در مدار جریان پیوسته، توان مصرف شده از رابطه $P = VI$ حساب می‌شود که واحد آن ولت-آمپر یا وات است.

دریك مدار جریان متناوب توان برابر حاصل ضرب ولتاژ لحظه‌ای درشدت جریان لحظه‌ای‌است. چون هـم اختلاف پتانسیل لحظه‌ای و هـم شدت لحظه‌ای تغییر می‌کنند و در لحظه‌هائی هم صفر می‌شوند بنابراین توان مصرف شده در هرپرید مقدار ثابتی نیست و بـاید اندازه متوسط آن حساب شود محاسبه نشان می‌دهد[1] که ایـن توان متوسط برابر است با:

$$\boxed{\bar{P} = V_e I_e \cos\varphi} \qquad (28-13)$$

۱- روش محاسبه شبیه به‌محاسبه شدت جریان مؤثر است که درهمین بخش بیان شده است.

یعنی توان متوسط مصرف‌شده دریک‌مدارجریان متناوب برابر است بـا حاصل ضرب اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار در شدت جریان مؤثر درکسینوس زاویه اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل.

مقدار $\cos\varphi$ را «ضریب توان» مدار گویند. ایـن ضریب، به‌طوری‌کـه از شکل (۱۳–۱۶) نیز استنباط می‌شود برابر $\frac{R}{Z}$ است. حاصل ضرب $V_e I_e$ را توان ظاهری‌مدار گویند ومعمولاً برحسب‌ولت‌آمپر بیان می‌شود. چنانچـه رابطـه (۱۳–۲۸) را به‌صورت:

$$\cos\varphi = \frac{P}{V_e I_e} \qquad (۱۳–۲۹)$$

بنویسیم، این رابطه نشان می‌دهد که ضریب توان برابر خارج قسمت تـوان متوسط برتـوان ظاهری است.

مصرف توان درحالات مختلف

الفـ در حالتی که مدار تنها شامل مقاومت R است، اختلاف فاز بین شدت و اختلاف پتانسیل صفر است. درنتیجه شدت جریان واختلاف پتانسیل هم‌فاز هستند (شکل ۱۳–۱۸– الف).

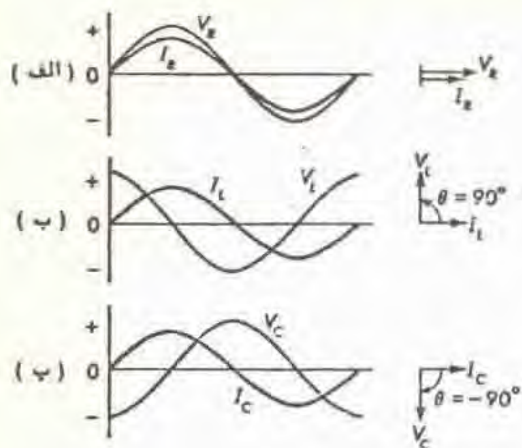
درنتیجه:

$$\cos\varphi = 1$$

و $$\bar{P} = V_e I_e = R I_e^2$$

دراین حالت روابط جریـان پیوسته عیناً در جریان متناوب به‌کار می‌روند.

بـ درحالتی که مدار فقط شامل اندوکتانس L است. در ایـن حالت اختلاف فـاز بین اختلاف



شکل ۱۳–۱۸– نمودارهای نمایش اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل بین اجزاء جداگانه یک‌مدار جریان متناوب.

پتانسیل و شدت جریان چنان کـه دیدیم $\frac{\pi}{۲}$ است (شکل ۱۳–۱۸–ب).

درنتیجه:

$$\bar{P} = 0 \text{ و } \cos\varphi = 0$$

یعنی توان متوسط مصرفی مدار صفر است.

پـ درحالتی‌که مدار فقط شامل خازن است. درحالت $\varphi = -\frac{\pi}{۲}$ است یعنی پتانسیل نسبت بـه شدت جریان $\frac{\pi}{۲}$ عقب است (شکـل ۱۳–۱۸–پ) و داریم:

$$\bar{P} = 0 \text{ و } \cos\varphi = 0$$

یعنی درخازن‌هم توان‌الکتریکی به‌مصرف نمی‌رسد.

پرسش ۱۳–۷ – پس انـرژی الکتریکـی داده شده به‌خازن چه‌می‌شود؟

تـ در حالتی مدار شامل مقاومت و سلف و خازن است (مدار R.L.C). در این حالت:

$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$ است که اندازه آن بستگی به R و Z

دارد و توان مصرف‌شده برابر است با:

$$\overline{P} = V_e I_e \cos\varphi = V_e I_e \frac{R}{Z}$$

و چون $Z = \frac{V_e}{I_e}$ است، پس:

$$\boxed{\overline{P} = V_e I_e \frac{R}{V_e/I_e} = RI_e^2}$$

یعنی توان الکتریکی در مدار R.L.C به صورت گرما به‌مصرف می‌رسد.

درحالت رزونانس داریم:

$$\overline{P} = V_e I_e \text{ و } \cos\varphi = 1 \text{ و } \varphi = 0$$

دراین حالت توان‌مصرف‌شده درمدارماکزیموم است.

توان مصرف‌شده دریك مدار جریان متناوب مستقیماً با اسبابی به‌نام واتمتر اندازه‌گرفته می‌شود در مدرج کردن این اسباب، هم اختلاف پتانسیل و هم شدت جریان وهم ضریب توان ($\cos\varphi$) در نظر گرفته می‌شود، بنابراین عقربه این دستگاه مستقیماً اندازه $V_e I_e \cos\varphi$ را نشان می‌دهد. برای تعیین ضریب توان یك مدار کافی است کمیتهای $\overline{P}$ و V_e و I_e را مستقیماً با واتمتر و ولتمتر وآمپرمتر اندازه بگیرند سپس از رابطه $\cos\varphi = \frac{P}{V_e I_e}$ ضریب توان را حساب کنند.

مثال- مداری ازیك مقاومت $R = 60.0\,\Omega$ و یك سلف $L = 0.250\,H$ و یك خازن $C = 50.0\,\mu F$ تشکیل یافته‌است که به‌طورمتوالی به‌هم‌بسته‌شده‌اند واین‌مدار به‌برق ۲۲۰/۰ ولت ۵۰/۰ هرتزمتصل است مطلوبست:

۱- رآکتانس $X = X_L - X_c$ مدار

۲- مقاومت ظاهری (امپدانس) مدار

۳- شدت جریان مؤثر درمدار و اختلاف فاز بین شدت واختلاف پتانسیل.

۴- ضریب توان مدار

۵- توان مصرف‌شده در مدار

- داریم:

۱)-

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 0.25 = 25\pi \text{ اهم}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 50 \times 10^{-6}} = \frac{10^3}{5\pi} = \frac{200}{\pi} \text{ اهم}$$

$$X = 25\pi - \frac{200}{\pi} \simeq 78.5 - 63.7 = 14.8 \text{ اهم}$$

۲)-

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(60)^2 + (14.8)^2} \simeq 61.8 \text{ اهم}$$

۳)-

$$I_e = \frac{V_e}{Z} = \frac{220}{61.8} \simeq 3.56 \text{ آمپر}$$

$$tg\varphi = \frac{X}{R} = \frac{14.8}{60} = 0.2466 \quad \varphi \simeq 13^\circ.5$$

۴)- ضریب توان: $\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{60}{61.8} \simeq 0.97$

یا: $\cos\varphi = \cos 13^\circ.5 \simeq 0.97$

۵)- توان مصرف شده درمدار:

$$\begin{cases} P=V_eI_e\cos\varphi=220\times 3/56\times 0/97\simeq 760W \\ \text{یا:}\quad P=RI_e^2=60\times(3/56)^2\simeq 760W \end{cases}$$

اختلاف‌پتانسیل بین‌اجزاء یک‌مدارجریان‌متناوب.
فاز شدت جریان در تمام قسمتهای یک مدار جریان متناوب‌که اجزاء مدار به‌طور متوالی بسته شده‌اند یکی است مثلاً اگر در یک لحظه شدت جریان در سلف ماکزیموم است در همان لحظه در مقاومت و خازن هم ماکزیمم‌است. یا اگر درسلف شدت‌جریان صفر است در مقاومت و خازن هم صفر است. ولی فاز اختلاف پتانسیلهای بین اجزاء مدار دوهرلحظه یکی نیست. مثلاً اگر اختلاف‌پتانسیل دوسر سلف دریک‌لحظه ماکزیموم یا صفر باشد اختلاف‌پتانسیل دوسر مقاومت یا خازن در آن لحظه ماکزیموم یا صفر نیست بلکه بین اختلاف پتانسیلهای اجزاءیک مدار اختلاف فاز وجود دارد.

برای محاسبه اختلاف پتانسیل مؤثر دو سر هرجزء از مدار کافی است‌که مقاومت ظاهری (یا امپدانس) آن جزء را در شدت جریان مؤثری‌که از مدار می‌گذرد ضرب‌کنیم یعنی:

$$V_i=I_eZ_i \qquad (30-13)$$

(V_i و Z_i به‌ترتیب‌نمایش اختلاف پتانسیل مؤثر و امپدانس هرجزء مدار است). اختلاف فاز بین شدت واختلاف پتانسیل نیز از رابطه‌زیرحساب می‌شود:

$$tg\varphi=\frac{X_i}{R_i} \qquad (31-13)$$

مثلاً در مدار شکل ۱۳-۱۵ که یك مقاومت بدون اندوکتانس R و یك سلف بدون مقاومت L و یك خازن C به‌طور متوالی به‌هم بسته شده‌اند اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر هرجزء و اختلاف فاز آن باشدت جریان به‌ترتیب زیر حساب می‌شود:

۱)- برای مقاومت R داریم:

$$\boxed{\varphi=0} \quad \text{و} \quad \boxed{V_e=I_eR} \qquad (32-13)$$

زیرا $Z_i=R$ و $X_i=0$ است.

بنابراین اختلاف پتانسیل دوسر یک‌مقاومت خالص با شدت جریانی‌که از آن می‌گذرد هم‌فاز است.

۲)- برای سلف L بدون مقاومت داریم:

$$(33-13)$$

$$\boxed{\varphi=+\frac{\pi}{2}} \quad \text{و} \quad \boxed{V_L=I_eX_L=I_eL\omega}$$

زیرا $Z_L=X_L$ و $R_L=0$ است. بنابراین اختلاف پتانسیل به‌اندازه ربع پرید از شدت جریان جلو است.

پرسش ۱۳-۸- اگر خودسلف‌دارای‌مقاومت R_L باشد اختلاف پتانسیل دوسر آن ازچه‌رابطه‌ای به‌دست می‌آید؟ دراین حالت اختلاف فاز φ چگونه حساب می‌شود؟

۳)- برای خازن C داریم:

$$(34-13)$$

$$\boxed{\varphi=-\frac{\pi}{2}} \quad \text{و} \quad \boxed{V_c=I_eX_c=I_e\times\frac{1}{C\omega}}$$

زیرا: $Z_i=X_c$ و $tg\theta=\dfrac{-X_c}{R=0}=-\infty$

بنابراین اختلاف پتانسیل دو سر یک خازن نسبت به‌شدت جریان به‌اندازه ربع پرید عقب‌است.

پرسش ۱۳-۹- در مداری که شامل مقاومت و سلف و خازن به‌طور متوالی است، آیا اختلاف پتانسیل کل دو سر مدار برابر مجموع اختلاف پتانسیلهای دوسر هریک از اجزاء مدار است؟

به‌این پرسشها پاسخ دهید

۱- چه شرطی لازم است تا درمدار بسته‌ای جریان القائی تولید شود؟

۲- چه‌نوع جریانی را جریان متناوب گویند؟

۳- آیا لازم است هر جریان متناوبی جریان سینوسی باشد؟ جریان سینوسی چه ویژگی دارد؟

۴- آلترناتورها (مولدهای جریان متناوب) چه‌نوع جریان متناوبی را تولید می‌کنند؟

۵- فرق یك آلترناتور دوقطبی با یك دینامـوی ساده مولد جریان‌متناوب در چیست؟

۶- به‌نظر شما چرا در آلترناتورها سیم‌پیچهای القاگیر را ثابت می‌گیرند و القاکن را درمقابل آنها می‌چرخانند.

۷- اصطلاحات فرکانس و آلترنانس را درجریان متناوب تعریف‌کنید.

۸- از سه‌اثر گرمایی و شیمیایی و مغناطیسی کدام‌یك برای جریانهای متناوب و پیوسته یکسان ظاهر می‌شود و بستگی به‌نوع جریان ندارد؟

۹- برای این‌که از جریان متناوب درصنعت آب فلزکاری استفاده شود چه بایدکرد؟

۱۰- آمپرسنجها و ولت‌سنجهائی که براساس خاصیت مغناطیسی برای جریان الکتریسیته پیوسته ساخته شده‌اند مستقیماً برای جریان متناوب قابل استفاده نیستند چگونه می‌توان آنها را برای جریان متناوب نیز قابل‌استفاده‌کرد؟

۱۱- اثر خود القائی یعنی چه؟

۱۲- درکدام‌یك از موارد زیر اثر خودالقائی به‌شدت ظاهر می‌شود؟

۱- لامپ روشنائی که به‌برق شهر متصل است.

۲- یك سولنوئید بدون‌هسته آهنی که به‌باتری اتومبیل متصل است.

۳- همین سولنوئید که به‌جریان برق متناوب متصل است.

۴- یك ترانسفورماتور که به‌برق شهر متصل است و از آن استفاده نمی‌شود.

۱۳- آیا می‌توان یك‌سلف باهسته آهنی را به‌جای رئوستا درجریان پیوسته به‌کار برد؟ درجریان متناوب چطور؟ درصورتی‌که جواب مثبت است آیا کاربرد آن در این مورد مزیتی‌بر

رئوستا دارد؟ توضیح دهید.

۱۴- برای‌این‌که یك مقاومت خالص بدون اثر خود القاء درمسیر جریان‌متناوب داشته باشیم می‌توانیم با سیم راکاملاً راست انتخاب‌کنیم یا آن را دولاکرده به‌شکل سیم‌پیچ درآوریم آیا می‌توانید علت را بیان‌کنید؟

۱۵- شدت جریان مؤثر یعنی چه؟ این اصطلاح آیا خاص جریان متناوب است یا برای جریان پیوسته نیز مصداق پیدا می‌کند.

۱۶- نقش مقاومت و سلف و خازن درجریان متناوب چیست؟ هریك را جداگانه توضیح دهید.

۱۷- مقاومت‌ظاهری (امپدانس) یك‌مدار جریان متناوب درهریك از حالتهای‌زیر چیست؟

۱- مدار شامل مقاومت R و سلف L به‌طور متوالی

۲- مدار شامل خازن C و مقاومت R به‌طور متوالی

۳- مدار شامل خازن C و سلف بدون مقاومت L به‌طور متوالی

درهریك از حالات سه‌گانه بالا اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل چیست؟

۱۸- ضریب توان چه نقشی در مدار جریان متناوب دارد؟ آیا مدار جریان پیوسته نیز ضریب توان دارد؟

۱۹- برای انتقال جریان متناوب ازمحل‌تولید به‌محل مصرف عملا بوسیله ترانسفورماتور ولتاژ را بالا می‌برند علت‌را توضیح دهید.

۲۰- ضریب توان یك‌سلف بدون‌مقاومت وقتی‌که از آن جریان متناوب می‌گذردچیست؟

۲۱- به‌دوسر یك سیم‌پیچ اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار است واز آن جریانی به‌شدت مؤثر I_e می‌گذرد واختلاف فاز بین شدت جریان واختلاف پتانسیل φ است. هرگاه یك هسته آهنی وارد سیم‌پیچ کنیم:

۱- I_e بیشتر و φ بزرگتر می‌شود

۲- I_e کمتر و φ کوچکتر می‌شود

۳- I_e بیشتر و φ کوچکتر می‌شود

۴- I_e کمتر و φ بزرگتر می‌شود.

درپاسخ درست بحث کنید.

۲۲- یك‌خازن متغیر (از ۱ تا ۱۰۰ میکروفاراد) ویك لامپ صدشمعی را به‌طورمتوالی به‌هم‌می‌بندیم وبرای خازن ظرفیت‌کمتر را اختیارکرده و دوسر مدار را به‌شبکه برق شهروصل می‌کنیم. هرگاه ظرفیت خازن را زیادکنیم:

۱- روشنائی چراغ زیاد می‌شود
۲- روشنائی چراغ کم می‌شود
۳- روشنائی چراغ تغییر نمی‌کند
۴- چراغ به‌کلی خاموش می‌شود. درپاسخ درست بحث کنید.

این مسئله‌ها را حل کنید

۱- ساده‌ترین صورت معادلهٔ یك جریان سینوسی، که تواترآن $50H_z$ و شدت مؤثر آن ۱ آمپر است چیست؟

۲- می‌دانیم مقدارمتوسط یك تابع‌سینوسی به‌صورت $y = y_m \sin \frac{2\pi}{T} t$ در مدت یك آلترنانس $(\frac{T}{2})$ برابر $\frac{2y_m}{\pi}$ است. براین اساس، مقدار الکتریسیته‌ای‌که توسط یك جریان متناوب به تواتر ۵۰ هرتز و به‌شدت مؤثر ۴/۴۵ آمپر درمدت یك آلترنانس انتقال می‌یابد چه اندازه است؟

جواب: تقریباً ۰/۰۴ کولن

۳- چه شدت جریانی ازیك سیم‌پیچ که ضریب خودالقائی آن ۳۵/۵ میلی‌هانری است باید بگذرد تا انرژی الکتریکی ذخیره‌شده درآن برابر $5/50 \times 10^{-2}$ ژول بشود؟

جواب: $1/76A$

۴- هرگاه به دوسر سیم‌پیچ یك آهنربای الکتریکی اختلاف پتانسیل پیوسته ۱۲۰ ولت برقرار سازیم جریانی به‌شدت ۱۲ آمپر ازآن می‌گذرد. ولی اگر به‌دوسر همین سیم‌پیچ اختلاف پتانسیل متناوبی که مقدار مؤثر آن ۱۲۰ ولت و فرکانس آن ۵۰ هرتز است ببندیم شدت جریان درسیم‌پیچ ۵ آمپر می‌شود. اندوکتانس سیم‌پیچ واختلاف فازبین شدت واختلاف‌پتانسیل جریان متناوب را حساب کنید.

جواب: تقریباً ۰/۰۷ هانری و تقریباً 65°

۵- مداری که شامل یك لامپ (به‌مقاومت ۳۰۰ اهم درحال روشن بودن) ویك خازن است به‌شبکه یك‌جریان متناوب ($V_e = 120$ ولت و $f = 50$ هرتز) متصل است وشدت‌جریان مؤثر درمدار ۰/۲۴ آمپر است. ظرفیت خازن را حساب کنید ومعادله‌شدت جریان‌رابنویسید.

جواب: $C = 8\mu F$ و $i = 0/34 \sin(314t + 0/93)$

۶- یك خازن به‌ظرفیت ۵۰/۰ میکروفاراد و یك مقاومت ۴۵/۰ اهم ویك سیم‌پیچ به اندوکتانس ۱۵۰/۰ هانری به‌طور متوالی بهم بسته شده‌اند وبین دوسر این مدارجریان‌متناوبی که‌اختلاف پتانسیل مؤثر آن ۲۰۸/۰ ولت وفرکانس آن ۶۰/۰ هرتز است برقرار شده است، مطلوبست:

۱- مقاومت ظاهری (امپدانس) مدار

۲- شدت جریان مؤثر درمدار

جواب: ۴۵/۱ اهم و ۴/۶۱ آمپر

۷- مداری تشکیل شده است ازیك سیم‌پیچ (به‌مقاومت R و به‌ضریب خود القایی L) و یك خازن به‌ظرفیت C که به‌طور متوالی بهم بسته شده‌اند و از مدار جریان متناوبی که‌شدت مؤثر آن ۰/۲ آمپر است می‌گذرد. ولت‌سنج اختلاف پتانسیل قسمتهای مختلف مدار رابشرح زیرمعین می‌کند:

اختلاف پتانسیل دوسر مدار ۱۲۰ ولت

اختلاف پتانسیل دوسر سیم‌پیچ ۱۶۰ ولت

اختلاف پتانسیل دوسر خازن ۵۶ ولت

اولاً- مقاومتهای ظاهری سیم‌پیچ و خازن را جداگانه حساب‌کنید.

ثانیاً- مقاومت R سیم‌پیچ را معین نمائید.

ثالثاً- اختلاف فاز بین شدت جریان واختلاف پتانسیل‌کل دوسر مدار را حساب‌کنید.

جواب: ۱) ۸۰۰ اهم و ۲۸۰ اهم ۲) ۴۸۰ اهم ۳) تقریباً ۰/۶۴ رادیان.

پاسخ به‌پرسشهای متن بخش ۱۳

۱۳-۱) - اندازه شدت جریان درمدار درلحظات $\frac{T}{4}$ و $3\frac{T}{4}$ ماکزیموم و درلحظات صفر و $\frac{T}{2}$ و T صفر است.

۱۳-۲)- جرم جسمی‌که در عمل الکترولیز درکاتد آزاد می‌شود طبق قانون فارادی با عوامل زیر متناسب است:

۱- مقدار الکتریسیته‌ای‌که از الکترولیت می‌گذرد

۲- هم‌ارز الکترو شیمیائی جسم.

۱۳-۳) - با یکسوکردن جریان متناوب به‌وسیله لامپ دوقطبی یا به‌وسیله دیگر.

۱۳-۴)- از رابطه $F=BlI_m \sin\omega t$ که درآن B شدت میدان و l طول قسمت متحرك و i شدت جریان لحظه‌ای است. ماکزیموم این نیرو برابر است با:

$$F_m=BlI_m$$

۱۳-۵)- به‌وسیله سیم‌پیچ خودالقا (که هسته آهنی نیز دارد). زیرا در سیم‌پیچ خودالقاء انرژی خیلی‌کم به‌صورت گرما تلف می‌شود درصورتی‌که در رئوستا به‌علت مقاومت الکتریکی که دارد مقدار زیادی از انرژی الکتریکی تلف می‌شود.

۱۳-۶)- رابطه $I_e=\frac{V_e}{X_L}=\frac{V_e}{L\omega}$

۱۳-۷)- دریك‌آلترنانس به‌صورت $\frac{۱}{۲}CV_e^{۲}$ در خازن ذخیره و در آلترنانس بعد به‌مدار بازگردانده می‌شود.

۱۳-۸)- اگر مقاومت‌سلف ناچیز نباشد $(R_L\neq ۰)$ خواهیم داشت:

$$Z_L=\sqrt{R_L^{۲}+X_L^{۲}}=\sqrt{R_L^{۲}+L^{۲}\omega^{۲}} \qquad (۱۳-۳۵)$$

بنابراین: $(۱۳-۳۶)$ $V_L=I_eZ_L=I_e\sqrt{R_L^{۲}+L^{۲}\omega^{۲}}$

دراین $\frac{\pi}{۲}>\varphi>۰$ است واز رابطه زیر حساب می‌شود:

$$tg\varphi=\frac{X_L}{R_L}=\frac{L\omega}{R_L} \qquad (۱۳-۳۷)$$

یادآوری- رابطه ۱۳-۳۵ را می‌توان از رابطه کلی $Z=\sqrt{R^{۲}+(X_L-X_c)^{۲}}$ نتیجه گرفت. کافی است قرار دهیم: $X_c=۰$ و $R=R_L$.

۱۳-۹)- نه. اختلاف پتانسیل کل دو سر مدار معمولاً کوچکتر از مجموع اختلاف پتانسیلهای دوسر هریك از اجزاء است یعنی:

$$V_e<V_R+V_L+C_c$$

می‌توانیم مانند (شکل۱۳-۱۸) اختلاف پتانسیل‌کل را از راه رسم به‌دست آوریم. بین اختلاف‌پتانسیل‌کل واختلاف‌پتانسیلهای دوسر هریك‌ازاجزاء مدار رابطه‌جبری زیر برقرار است:

$$V_e^{۲}=V_R^{۲}+(V_L-V_c)^{۲}$$

الکتریکی R اختلاف پتانسیل متناوب $v=V_m \sin\omega t$ برقرار شده است.

شدت جریانی که در هرلحظه از این مقاومت می‌گذرد طبق قانون اهم از رابطه $v=iR$ حساب می‌شود. چون مقاومت R محسوساً ثابت است، اختلاف پتانسیل در هرلحظه متناسب باشدت جریان است در نتیجه v و i هم فاز هستند وخواهیم داشت:

$$i=\frac{v}{R}=\frac{V_m}{R}\sin\omega t=I_m \sin\omega t$$

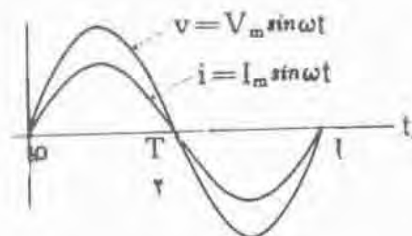
یا $$I_m=\frac{V_m}{R} \quad (۱۴-۱۳)$$

نمودارهای شکل ۱۳-۱۲ هم‌فاز بودن v و i رانشان می‌دهند: به‌طوری که‌درشکل‌دیده‌می‌شود اختلاف پتانسیل وشدت جریان باهم صفر و با هم ماکزیموم می‌شوند.

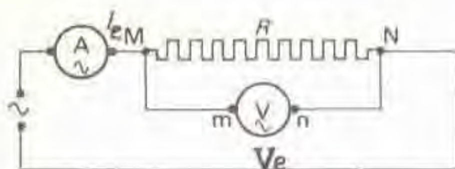
بین شدت جریان مؤثر و اختلاف پتانسیل مؤثر نیز رابطه زیر برقرار است:

$$I_e=\frac{V_e}{R} \quad (۱۵-۱۳)$$

این رابطه را می‌توان مستقیماً با اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل به‌وسیله آمپرسنج و ولت‌سنج، مطابق شکل (۱۳-۱۳) تحقیق کرد.



شکل ۱۳-۱۲- برای یك مقاومت خالص، اختلاف پتانسیل و شدت جریان هم فاز هستند



شکل ۱۳-۱۳- تحقیق تجربی رابطه

$$I_e=\frac{V_e}{R}$$

۲- حالتی که مدار شامل خودالقا است- اینك‌درنظر بگیریم که بدوسریك خودالقاء (سلف) که‌اندوکتانس آن L و مقاومت الکتریکی آن ناچیز است (مثلاً بدوسر یك سیم‌پیچ بدون مقاومت‌که دارای هسته آهنی است) اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است. چون اختلاف پتانسیل دو سر یك خود القاء برابر $L\frac{di}{dt}$ است اگر معادله جریان را به صورت $i=I_m \sin\omega t$ نمایش دهیم خواهیم داشت:

$$v=L\frac{di}{dt}=LI_m\omega\cos\omega t$$

یا: (۱۶-۱۳)

$$v=L\omega I_m \sin(\omega t+\frac{\pi}{۲})=V_m \sin(\omega t+\frac{\pi}{۲})$$

این رابطه نشان می‌دهدکه اولاً بین شدت جریان i واختلاف پتانسیل v اختلاف فاز $\frac{\pi}{۲}$ وجود دارد و اختلاف پتانسیل نسبت به‌شدت جریان جلو است یعنی به‌اندازه زمان $\frac{T}{۴}$ زودتر از شدت‌جریان ماکزیموم یا صفر می‌شود (به شکل ۱۳-۱۸-ب مراجعه شود).

ثانیاً شدت جریان ماکزیمومی که می‌تواند از

این خود القا بگذرد برابر است با:

$$I_m = \frac{V_m}{L\omega} \qquad (۱۷-۱۳)$$

از مقایسه این رابطه با رابطه معمولی قانون اهم نتیجه می‌شود که خود القا (یا سلف) در مقابل عبور جریان متناوب یك مقاومت ظاهری $L\omega$ ایجاد می‌کند که هرچه اندوکتانس L بیشتر و یا فرکانس جریان زیادتر باشد اندازه این مقاومت بیشتر است. این مقاومت ظاهری را معمولاً به X_L نمایش می‌دهند و ما آن را «مقاومت القائی»[1] می‌نامیم. بنابراین:

$$X_L = L\omega = ۲\pi f L \qquad (۱۸-۱۳)$$

که در آن L برحسب هانری و f برحسب هرتز (یا ω برحسب رادیان برثانیه) و X_L برحسب اهم است.

مثال ـ مطلوبست مقاومت القائی سولنوئیدی که ضریب خود القائی (اندوکتانس) آن $L = ۲/۰ \times ۱۰^{-۳}H$ است و از آن برق شهر با فرکانس ۵۰ هرتز می‌گذرد.

ـ داریم:

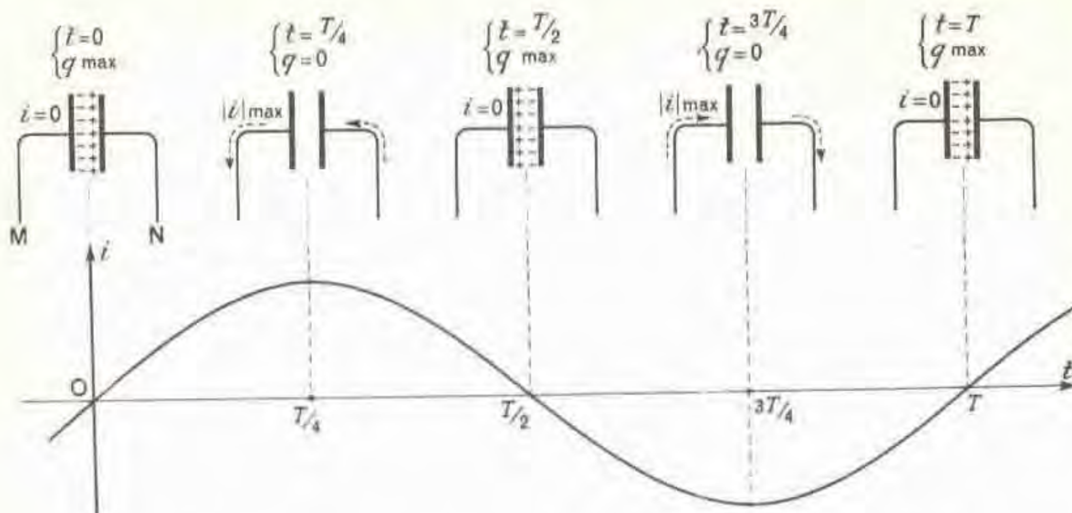
$$X_L = ۲\pi f L = ۲ \times ۳/۱۴ \times ۵۰ \times ۲/۰ \times ۱۰^{-۳} \simeq ۰/۶۳\Omega$$

پرسش ۱۳-۶ـ بین اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر در یك خودالقا، چه رابطه‌ای برقرار است؟

۳ـ حالتی که مدار فقط شامل خازن است. اگر دو صفحه یك خازن را به قطب یك باتری جریان پیوسته وصل کنیم پس از پرشدن خازن جریان در مدار صفر می‌شود. به‌عبارت دیگر خازن در مدار جریان پیوسته در حکم یك مقاومت بینهایت است که مانع عبور جریان می‌شود. ولی اگر بین دو صفحه خازن اختلاف پتانسیل متناوبی بسته شود رفتار خازن بکلی متفاوت خواهد بود وخازن مانع عبور جریان از مدار نمی‌شود؛ وقتی جهت اختلاف پتانسیل دو سر خازن عوض می‌شود جهت جریان در مدار خازن نیز عوض می‌شود. بنابراین جریان در مدار خازن در اثر پرشدن و خالی‌شدن متناوب خازن برقرار می‌شود وتواتر جریان در مدار خازن برابر تواتر جریان اصلی است (شکل ۱۳-۱۴). و در این عمل خازن در مقابل جریان یك مقاومت ظاهری ایجاد می‌کندکه بستگی به‌ظرفیت خازن و فرکانس جریان‌دارد وهرچه ظرفیت خازن یافرکانس جریان بزرگتر باشد این مقاومت کوچکتر است. ولی خازن با مقاومت معمولی این تفاوت را دارد که درخازن انرژی الکتریکی مصرف نمی‌شود بلکه به‌صورت انرژی الکتروستاتیکی $\frac{۱}{۲}CV^۲$ ذخیره‌می‌گردد، درصورتی که دریك‌مقاومت، انرژی‌الکتریکی به‌صورت گرما تلف می‌شود.

برای محاسبهٔ مقاومت ظاهری خازن، درنظر بگیریم که بین دو صفحه خازن اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است که اندازه آن دریك‌لحظه t برابر v است. بار الکتریکی q که در این لحظه

۱ـ اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی Inductive Reactance است.



شکل ۱۳-۱۴- جریان متناوب در مدار خازن در اثر پر شدن و خالی‌شدن متوالی خازن برقرار می‌شود.

روی هر صفحه خازن موجود است برابر خواهد بود با:

$$q = Cv \qquad (۱۳-۱۹)$$

که درآن C ظرفیت خازن است.

چون اختلاف پتانسیل ثابت نیست پس از گذشت زمان بینهایت کوچك dt (یعنی بین دولحظهٔ t و t+dt)بار الکتریکی به‌اندازه dq تغییر می‌کند وشدت جریان حاصل از این تغییر بار از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dv}{dt}$$

یا:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i}{C}$$

اگر معادله شدت جریان‌را به‌صورت: $i = I_m sin\omega t$ در نظر بگیریم خواهیم داشت

$$\frac{dv}{dt} = \frac{I_m}{C} sin\omega t$$

$\frac{dv}{dt}$ مشتق اختلاف پتانسیل u نسبت به زمان t است، بنابراین برای به‌دست‌آوردن v کافی است تابع اولیه رابطه بالارا حساب‌کنیم. یعنی:

$$v = -\frac{I_m}{C\omega}cos\omega t = \frac{I_m}{C\omega}sin(\omega t - \frac{\pi}{۲}) =$$

$$= V_m sin(\omega t - \frac{\pi}{۲}) \qquad (۱۳-۲۰)$$

(زیرا تابع اولیه $sin\omega t$ برابر $-\frac{۱}{\omega}cos\omega t$ است.)

این رابطه نشان می‌دهد که اولاً بین شدت جریان i واختلاف پتانسیل v اختلاف فاز $-\frac{\pi}{۲}$ موجود است و پتانسیل نسبت به شدت عقب است به عبارت دیگر شدت جریان نسبت به اختلاف پتانسیل جلو است. یعنی شدت جریان همواره به اندازه زمان $\frac{T}{۴}$ زودتر از اختلاف پتانسیل، به مقدار ماکزیمم یا صفر می‌رسد (به‌شکل ۱۳-۱۸پ

مراجعه کنید). ثانیا بین اختلاف پتانسیل، ماکزیمم V_m وشدت جریان ماکزیمم I_m رابطه زیر برقرار است:

$$V_m = \frac{I_m}{C\omega}$$

یا:

$$I_m = C\omega \cdot V_m = \frac{V_m}{\frac{۱}{C\omega}} \quad (۲۱-۱۳)$$

رابطه بالا را به این جهت به صورت: $I_m = \frac{V_m}{\frac{۱}{C\omega}}$ نوشته‌ایم کـه بتوانیم آن را بـا رابطه اساسی اهم ($I_m = \frac{V_m}{R}$) مقایسه کنیم. ایـن رابطه نشان می‌دهد که خازن درمقابل عبور جریان‌متناوب از مـدار، یك مقـاومت ظـاهـری از خود نشان می‌دهد که اندازه آن برابر $\frac{۱}{C\omega}$ است. این مقاومت ظاهری را معمولاً به X_c نمایش می‌دهند و ما آن را «مقاومت ظرفیتی[۱]» می‌نامیم، بنابراین:

$$X_c = \frac{۱}{C\omega} = \frac{۱}{۲\pi fC} \quad (۲۲-۱۳)$$

که درآن C برحسب فاراد و f برحسب هرتز و X_c برحسب اهم است. بدیهی است بین اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر درمدار خازن رابطهٔ: $I_e = \frac{V_e}{X_c}$ برقرار است

مثال ـ هرگاه دوسر خازنی به‌ظرفیت ۲/۰ میکرو-فاراد را با سیمهای بدون مقاومت به برق‌شهر وصل کنیم اولاً چه‌مقاومت ظرفیتی در برابر این جریان ایجاد خواهد کرد؟ ثانیاً اگر اختلاف پتانسیل دوسر آن ۲۲۰ ولت باشد چه شدت جریـانی از مدار آن خواهد گذشت؟

ـ اولاً داریم:

$$X_c = \frac{۱}{۲\pi fC}$$

به‌ازاء $C = ۲\mu F = ۲ \times ۱۰^{-۶} F$ و $f = ۵۰ Hz$ خواهیم داشت:

$$X_c = \frac{۱}{۲ \times ۳/۱۴ \times ۵۰ \times ۲ \times ۱۰^{-۶}} = \frac{۱۰^۴}{۲ \times ۳/۱۴} = \frac{۵ \times ۱۰^۳}{۳/۱۴} \Omega$$

یا:

$$X_c \simeq ۱/۶ \times ۱۰^۳ \Omega$$

ثانیاً:

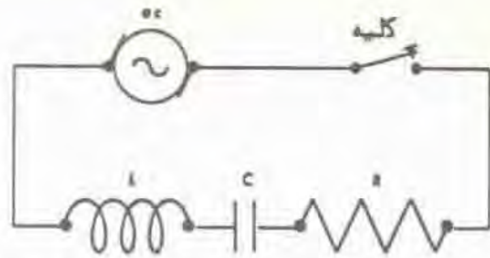
$$I_e = \frac{V_e}{X_c} = ۲\pi fC \times V_e$$

یا:

$$I_e = ۲ \times ۳/۱۴ \times ۵۰ \times ۲/۰ \times ۱۰^{-۶} \times ۲۲۰ \simeq ۰/۱۴ A$$

۴ـ مدار شامل مقاومت و سلف و خـازن است ـ حالت کلی ـ اینك مـداری در نظر بگیریم شامـل مقاومت R وخازن C وسلف L که به‌طورمتوالی به‌هم بسته شده‌اند (شکل ۱۳ـ۱۵) و بین دو سر مـدار

۱ـ اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی **Capacitive Reactance** است.



شکل ۱۳-۱۵- مدار جریان متناوب شامل مقاومت و خازن و سلف که به‌طورمتوالی به‌هم بسته شده‌اند.

اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است. اگر اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار V_e باشد، شدت جریان مؤثر درمدار از رابطهٔزیر حساب می‌شود[1]:

$$I_e=\frac{V_e}{\sqrt{R^2+(X_L-X_c)^2}} \quad (۲۳-۱۳)$$

دراین رابطه $\sqrt{R^2+(X_L-X_c)^2}$ مقاومت ظاهری کل مدار است‌که «امپدانس[2]» مدار نامیده می‌شود ومعمولاً آن‌را به Z نمایش می‌دهند و واحد آن اهم است. بنابراین:

$$Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_c)^2} \quad (۲۴-۱۳)$$

و
$$I_e=\frac{V_e}{Z} \quad (۲۵-۱۳)$$

این رابطه نظیر فرمول اهم یعنی $I=\frac{V}{R}$ است‌که به‌جای R، مقاومت ظاهری Z قرار گرفته است. $X=X_L-X_c$ را رآکتانس مدار گویند.

یادآوری- اگر سلف، خود نیز دارای مقاومت کوچکی باشد، مقاومت آن بامقاومت R جمع می‌شود. دراین‌صورت R مقاومت کل‌مدار خواهدبود.

روش ترسیم برای تعیین Z- روابط بین R و X_L و X_c و Z را می‌توان از راه ترسیم مانند روش برداری نیز نشان داد (شکل ۱۳-۱۶): مقاومت R را مطابق شکل، با یک بردارکه طول آن متناسب با اندازه R است با انتخاب یک‌واحد مناسب روی محور افقی ox نمایش می‌دهیم، سپس رآکتانسهای X_L و X_c را با همان واحد به‌وسیله دو بردار در خلاف جهت یکدیگر روی محور oy عمودبر ox نمایش می‌دهیم در این صورت اندازه Z برابر طول برآیند سه‌بردار R و X_L و X_c خواهد بود.

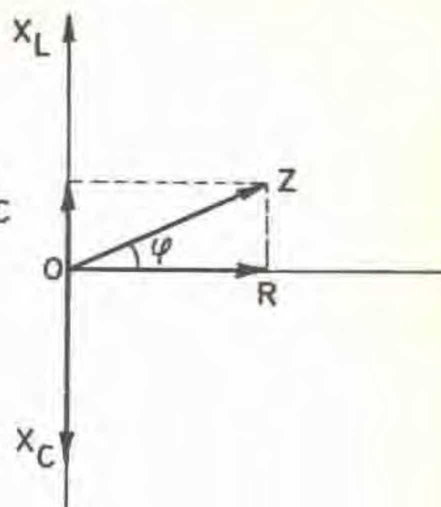
اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل- وجود سلف و خازن در مدار جریان متناوب سبب می‌شودکه‌بین شدت‌جریان‌واختلاف پتانسیل‌اختلاف فازی‌به‌وجودآید. اندازه‌این‌اختلاف‌فاز، به‌طوری‌که از شکل (۱۳-۱۶) نیز استنباط می‌شود، از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$tg\varphi=\frac{X_L-X_c}{R} \quad (۲۶-۱۳)$$

اگر $X_L > X_c$ باشد $\varphi > 0$ است، در

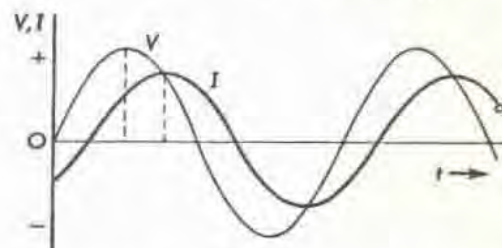
۱- با محاسباتی نظیر آنچه‌گذشت می‌توان به‌آسانی این رابطه را به‌دست آورد.

۲- Impedance



شکل (۱۳-۱۶)ـ روش ترسیم برای تعیین امپدانس مدار جریان متناوب.

نتیجه اختلاف‌پتانسیل v نسبت به‌شدت i جلواست. اگر $X_L < X_c$ باشد $\varphi < 0$ است و اختلاف پتانسیل نسبت به‌شدت جریـان عقب است. شکل (۱۳-۱۷) حالتی را نشان می‌دهدکه i نسبت به v به‌اندازه $\frac{\pi}{4}$ عقب‌است. به‌عبارت‌دیگر شدت‌جریان به‌اندازه $\frac{1}{8}$ پرید از ولتاژ عقب است.



شکل۱۳-۱۷-شدت جریان به‌اندازه $\frac{\pi}{4}$ نسبت به‌اختلاف پتانسیل عقب‌است.

حالت رزونانس. اگر $X_L = X_c$ باشد $\varphi = 0$ است. دراین حالت امپدانس Z کمترین مقدار خود را دارد و برابر R است. در نتیجه شدت جریان در مدار به بیشترین مقدارخود می‌رسد که مقدار مؤثر آن‌برابر با $I_e = \frac{V_e}{R}$ است، دراین‌صورت می‌گویند مدار در حال رزونانس یا تشدید است. دراین‌حالت خواهیم داشت:

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

یا:

$$\boxed{LC\omega^2 = 1} \qquad (۱۳-۲۷)$$

توان درمدار جریان متناوب- ضریب توان. می‌دانیم در مدار جریان پیوسته، توان مصرف شده از رابطه $P = VI$ حساب می‌شود که واحد آن ولت-آمپر یا وات است.

دریك مدار جریان متناوب توان برابر حاصل ضرب ولتاژ لحظه‌ای درشدت جریان لحظه‌ای‌است. چون هـم اختلاف پتانسیل لحظه‌ای و هـم شدت لحظه‌ای تغییر می‌کنند و در لحظه‌هائی هم صفر می‌شوند بنابراین توان مصرف شده در هرپرید مقدار ثابتی نیست و بـاید اندازه متوسط آن حساب شود محاسبه نشان می‌دهد[1] که ایـن توان متوسط برابر است با:

$$\boxed{\overline{P} = V_e I_e \cos\varphi} \qquad (۱۳-۲۸)$$

۱ـ روش محاسبه شبیه به‌محاسبه شدت جریان مؤثر است که درهمین بخش بیان شده است.

یعنی توان متوسط مصرف‌شده دریک مدارجریان متناوب برابر است با حاصل ضرب اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار در شدت جریان مؤثر درکسینوس زاویه اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل.

مقدار $cos\varphi$ را «ضریب توان» مدار گویند. این ضریب، به‌طوری‌که از شکل (۱۳–۱۶) نیز استنباط می‌شود برابر $\frac{R}{Z}$ است. حاصل ضرب V_eI_e را توان ظاهری‌مدار گویند ومعمولاً برحسب‌ولت‌ـ آمپر بیان می‌شود. چنانچه رابطه (۱۳–۲۸) را به‌صورت:

$$cos\varphi = \frac{P}{V_eI_e} \qquad (۱۳–۲۹)$$

بنویسیم، این رابطه نشان می‌دهد که ضریب توان برابر خارج قسمت توان متوسط برتوان ظاهری است.

مصرف توان درحالات مختلف

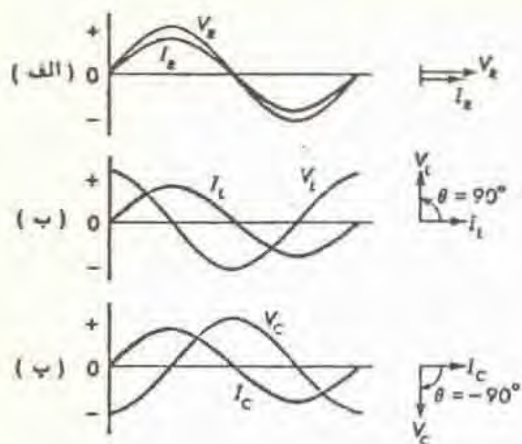
الف‌ـ در حالتی که مدار تنها شامل مقاومت R است، اختلاف فاز بین شدت و اختلاف پتانسیل صفر است. درنتیجه شدت جریان واختلاف پتانسیل هم‌فاز هستند (شکل ۱۳–۱۸– الف).

• درنتیجه:

$$cos\varphi = ۱ \quad و \quad \overline{P} = V_eI_e = RI_e^۲$$

دراین حالت روابط جریان پیوسته عیناً در جریان متناوب به‌کار می‌روند.

ب‌ـ درحالتی که مدار فقط شامل اندوکتانس L است. در این حالت اختلاف فاز بین اختلاف



شکل ۱۳–۱۸– نمودارهای نمایش اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل بین اجزاء جداگانه یک‌مدار جریان متناوب.

پتانسیل و شدت جریان چنان که دیدیم $\frac{\pi}{۲}$ است (شکل ۱۳–۱۸–ب).

درنتیجه:

$$\overline{P} = ۰ \quad و \quad cos\varphi = ۰$$

یعنی توان متوسط مصرفی مدار صفر است.

پ‌ـ درحالتی‌که مدار فقط شامل خازن است. درحالت $\varphi = -\frac{\pi}{۲}$ است یعنی پتانسیل نسبت به شدت جریان $\frac{\pi}{۲}$ عقب است (شکل ۱۳–۱۸–پ) و داریم:

$$\overline{P} = ۰ \quad و \quad cos\varphi = ۰$$

یعنی درخازن‌هم توان‌الکتریکی به‌مصرف نمی‌رسد.

پرسش ۱۳–۷ – پس انرژی الکتریکی داده شده به‌خازن چه‌می‌شود؟

ت‌ـ در حالتی مدار شامل مقاومت و سلف و خازن است (مدار R.L.C). در این حالت:

$cos\varphi = \frac{R}{Z}$ است که اندازه آن بستگی به R و Z

دارد و توان مصرف‌شده برابر است با:

$$\overline{P}=V_eI_e\cos\varphi=V_eI_e\frac{R}{Z}$$

و چون $Z=\frac{V_e}{I_e}$ است، پس:

$$\boxed{\overline{P}=V_eI_e\,\frac{R}{V_e/I_e}=RI_e^{۲}}$$

یعنی توان الکتریکی در مدار R.L.C به صورت گرما به‌مصرف می‌رسد.

درحالت رزونانس داریم:

$$\overline{P}=V_eI_e \quad \text{و} \quad \cos\varphi=۱ \quad \text{و} \quad \varphi=۰$$

دراین حالت توان‌مصرف‌شده درمدارماکزیموم است.

توان مصرف‌شده دریك مدار جریان متناوب مستقیماً با اسبابی به‌نام واتمتر اندازه‌گرفته می‌شود در مدرج کردن این اسباب، هم اختلاف پتانسیل و هم شدت جریان وهم ضریب توان ($\cos\varphi$) در نظر گرفته می‌شود، بنابراین عقربه این دستگاه مستقیماً اندازه $V_eI_e\cos\varphi$ را نشان می‌دهد. برای تعیین ضریب توان یك مدار کافی است کمیتهای $\overline{P}$ و V_e و I_e را مستقیماً با واتمتر و ولتمتر وآمپرمتر اندازه بگیرند سپس از رابطه $\cos\varphi=\frac{P}{V_eI_e}$ ضریب توان را حساب کنند.

مثال- مداری ازیك مقاومت $R=۶۰/۰\Omega$ و یك سلف $L=۰/۲۵۰H$ و یك خازن $C=۵۰/۰\mu F$ تشکیل یافته‌است که به‌طورمتوالی به‌هم بسته‌شده‌اند واین‌مدار به‌برق ۲۲۰/۰ ولت ۵۰/۰ هرتزمتصل است مطلوبست:

۱- رآکتانس $X=X_L-X_c$ مدار

۲- مقاومت ظاهری (امپدانس) مدار

۳- شدت جریان مؤثر درمدار و اختلاف فاز بین شدت واختلاف پتانسیل.

۴- ضریب توان مدار

۵- توان مصرف‌شده در مدار

- داریم:

-(۱

$$X_L=۲\pi fL=۲\pi\times ۵۰\times ۰/۲۵=۲۵\pi \text{ اهم}$$

$$X_c=\frac{۱}{۲\pi fC}=\frac{۱}{۲\pi\times ۵۰\times ۵۰\times ۱۰^{-۶}}=\frac{۱۰^{۳}}{۵\pi}=\frac{۲۰۰}{\pi} \text{ اهم}$$

$$X=۲۵\pi-\frac{۲۰۰}{\pi}\simeq ۷۸/۵-۶۳/۷=۱۴/۸ \text{ اهم}$$

-(۲

$$Z=\sqrt{R^{۲}+X^{۲}}=\sqrt{(۶۰)^{۲}+(۱۴/۸)^{۲}}\simeq ۶۱/۸ \text{ اهم}$$

-(۳

$$I_e=\frac{V_e}{Z}=\frac{۲۲۰}{۶۱/۸}\simeq ۳/۵۶ \text{ آمپر}$$

$$tg\varphi=\frac{X}{R}=\frac{۱۴/۸}{۶۰}=۰/۲۴۶۶ \quad \varphi\simeq ۱۳^\circ/۵$$

۴)- ضریب توان: $\cos\varphi=\frac{R}{Z}=\frac{۶۰}{۶۱/۸}\simeq ۰/۹۷$

یا: $\cos\varphi=\cos ۱۳^\circ/۵\simeq ۰/۹۷$

۵)- توان مصرف شده درمدار:

$$\begin{cases} P=V_e I_e \cos\varphi = ۲۲۰ \times ۳/۵۶ \times ۰/۹۷ \simeq ۷۶۰W \\ \text{یا:} \quad P=RI_e^۲ = ۶۰ \times (۳/۵۶)^۲ \simeq ۷۶۰W \end{cases}$$

اختلاف‌پتانسیل بین‌اجزاء یك‌مدارجریان‌متناوب- فاز شدت جریان در تمام قسمتهای یك مدار جریان متناوب‌که اجزاء مدار به‌طور متوالی بسته شده‌اند یکی است مثلاً اگر در یك لحظه شدت جریان در سلف ماکزیموم است در همان لحظه در مقاومت و خازن هم ماکزیمم‌است. یا اگر درسلف شدت‌جریان صفر است در مقاومت و خازن هم صفر است. ولی فاز اختلاف پتانسیلهای بین اجزاء مدار دوهرلحظه یکی نیست. مثلاً اگر اختلاف‌پتانسیل دوسر سلف دریك‌لحظه ماکزیموم یا صفر باشد اختلاف‌پتانسیل دوسر مقاومت یا خازن در آن لحظه ماکزیموم یا صفر نیست بلکه بین اختلاف پتانسیلهای اجزاءیك مدار اختلاف فاز وجود دارد.

برای محاسبه اختلاف پتانسیل مؤثر دو سر هرجزء از مدار کافی است‌که مقاومت ظاهری (یا امپدانس) آن جزء را در شدت جریان مؤثری‌که از مدار می‌گذرد ضرب‌کنیم یعنی:

$$V_i = I_e Z_i \qquad (۳۰-۱۳)$$

(V_i و Z_i به‌ترتیب‌نمایش اختلاف پتانسیل مؤثر و امپدانس هرجزء مدار است). اختلاف فاز بین شدت واختلاف پتانسیل نیز از رابطه‌زیر حساب می‌شود:

$$tg\varphi = \frac{X_i}{R_i} \qquad (۳۱-۱۳)$$

مثلاً در مدار شکل ۱۳-۱۵ که یك مقاومت بدون اندوکتانس R و یك سلف بدون مقاومت L و یك خازن C به‌طور متوالی به‌هم بسته شده‌اند اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر هرجزء و اختلاف فاز آن باشدت جریان به‌ترتیب زیر حساب می‌شود:

۱)- برای مقاومت R داریم:

$$\boxed{\varphi = ۰} \quad \text{و} \quad \boxed{V_e = I_e R} \qquad (۳۲-۱۳)$$

زیرا $Z_i = R$ و $X_i = ۰$ است.

بنابراین اختلاف پتانسیل دوسر یك‌مقاومت خالص با شدت جریانی‌که از آن می‌گذرد هم‌فاز است.

۲)- برای سلف L بدون مقاومت داریم:

$$\boxed{\varphi = +\frac{\pi}{۲}} \quad \text{و} \quad \boxed{V_L = I_e X_L = I_e L\omega} \qquad (۳۳-۱۳)$$

زیرا $Z_L = X_L$ و $R_L = ۰$ است. بنابراین اختلاف پتانسیل به‌اندازه ربع پرید از شدت جریان جلو است.

پرسش ۱۳-۸- اگر خودسلف‌دارای‌مقاومت R_L باشد اختلاف پتانسیل دوسر آن ازچه‌رابطه‌ای به‌دست می‌آید؟ دراین حالت اختلاف فاز φ چگونه حساب می‌شود؟

۳)- برای خازن C داریم:

$$\boxed{\varphi = -\frac{\pi}{۲}} \quad \text{و} \quad \boxed{V_c = I_e X_c = I_e \times \frac{۱}{C\omega}} \qquad (۳۴-۱۳)$$

زیرا: $Z_i = X_c$ و $tg\theta = \dfrac{-X_c}{R=۰} = -\infty$

بنابراین اختلاف پتانسیل دو سر یک خازن و سلف و خازن بطور متوالی است ، آیا اختلاف نسبت بهشدت جریان بهاندازه ربع پرید عقب‌است. پتانسیل کل دو سر مدار برابر مجموع اختلاف

پرسش ۱۳-۹- در مداری‌که شامل مقاومت پتانسیلهای دوسر هریك از اجزاء مدار است؟

بهاین پرسشها پاسخ دهید

۱- چه شرطی لازم است تا درمدار بسته‌ای جریان القائی تولید شود؟

۲- چه‌نوع جریانی را جریان متناوب‌گویند؟

۳- آیا لازم است هر جریان متناوبی جریان سینوسی باشد؟ جریان سینوسی چه ویژگی دارد؟

۴- آلترناتورها (مولدهای جریان متناوب) چه‌نوع جریان متناوبی را تولید می‌کنند؟

۵- فرق یك آلترناتور دوقطبی با یك دینامو‌ی ساده مولد جریان‌متناوب در چیست؟

۶- به‌نظر شما چرا در آلترناتورها سیم‌پیچهای القاگیر را ثابت می‌گیرند و القاکن را درمقابل آنها می‌چرخانند.

۷- اصطلاحات فرکانس و آلترنانس را درجریان متناوب تعریف‌کنید.

۸- از سه‌اثر گرمایی و شیمیایی و مغناطیسی کدام‌یك برای جریانهای متناوب و پیوسته یکسان ظاهر می‌شود و بستگی به‌نوع جریان ندارد؟

۹- برای این‌که از جریان متناوب درصنعت آب فلزکاری استفاده شود چه بایدکرد؟

۱۰- آمپرسنجها و ولت‌سنجهائی که براساس خاصیت مغناطیسی برای جریان الکتریسیته پیوسته ساخته شده‌اند مستقیماً برای جریان متناوب قابل استفاده نیستند چگونه می‌توان آنها را برای جریان متناوب نیز قابل‌استفاده‌کرد؟

۱۱- اثر خود القائی یعنی چه؟

۱۲- درکدام‌یك از موارد زیر اثر خودالقائی به‌شدت ظاهر می‌شود؟

۱- لامپ روشنائی‌که به‌برق شهر متصل است.

۲- یك سولنوئید بدون‌هسته آهنی‌که به‌باتری اتومبیل متصل است.

۳- همین سولنوئیدکه به‌جریان برق متناوب متصل است.

۴- یك ترانسفورماتورکه به‌برق شهر متصل است و از آن استفاده نمی‌شود.

۱۳- آیا می‌توان یك‌سلف باهسته آهنی را به‌جای رئوستا درجریان پیوسته به‌کار برد؟ درجریان متناوب چطور؟ درصورتی‌که جواب مثبت است آیا کاربرد آن در این مورد مزیتی‌بر

رئوستا دارد؟ توضیح دهید.

۱۴- برای‌اینکه یك مقاومت خالص بدون اثر خود القاء درمسیر جریان‌متناوب داشته باشیم می‌توانیم با سیم راکاملاً راست انتخاب‌کنیم یا آن را دولاکرده به‌شکل سیم‌پیچ درآوریم آیا می‌توانید علت را بیان‌کنید؟

۱۵- شدت جریان مؤثر یعنی چه؟ این اصطلاح آیا خاص جریان متناوب است یا برای جریان پیوسته نیز مصداق پیدا می‌کند.

۱۶- نقش مقاومت و سلف و خازن درجریان متناوب چیست؟ هریك را جداگانه توضیح دهید.

۱۷- مقاومت‌ظاهری (امپدانس) یك‌مدار جریان متناوب درهریك از حالتهای‌زیر چیست؟

۱- مدار شامل مقاومت R و سلف L به‌طور متوالی

۲- مدار شامل خازن C و مقاومت R به‌طور متوالی

۳- مدار شامل خازن C و سلف بدون مقاومت L به‌طور متوالی

درهریك از حالات سه‌گانه بالا اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل چیست؟

۱۸- ضریب توان چه نقشی در مدار جریان متناوب دارد؟ آیا مدار جریان پیوسته نیز ضریب توان دارد؟

۱۹- برای انتقال جریان متناوب ازمحل‌تولید به‌محل مصرف عملاً به‌وسیله ترانسفورماتور ولتاژ را بالا می‌برند علت‌را توضیح دهید.

۲۰- ضریب توان یك‌سلف بدون‌مقاومت وقتی‌که از آن جریان متناوب می‌گذردچیست؟

۲۱- به‌دوسر یك سیم‌پیچ اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار است واز آن جریانی به‌شدت مؤثر I_e می‌گذرد واختلاف فاز بین شدت جریان واختلاف پتانسیل φ است. هرگاه یك هسته آهنی وارد سیم‌پیچ کنیم:

۱- I_e بیشتر و φ بزرگتر می‌شود

۲- I_e کمتر و φ کوچکتر می‌شود

۳- I_e بیشتر و φ کوچکتر می‌شود

۴- I_e کمتر و φ بزرگتر می‌شود.

درپاسخ درست بحث کنید.

۲۲- یك‌خازن متغیر (از ۱ تا ۱۰۰ میکروفاراد) ویك لامپ صدشمعی را به‌طورمتوالی به‌هم‌می‌بندیم وبرای خازن ظرفیت‌کمتر را اختیارکرده و دوسر مدار را به‌شبکه برق شهروصل می‌کنیم. هرگاه ظرفیت خازن را زیادکنیم:

۱- روشنائی چراغ زیاد می‌شود
۲- روشنائی چراغ کم می‌شود
۳- روشنائی چراغ تغییر نمی‌کند
۴- چراغ به‌کلی خاموش می‌شود.   درپاسخ درست بحث کنید.

این مسئله‌ها را حل کنید

۱- ساده‌ترین صورت معادلهٔ یك جریان سینوسی، که تواترآن $50 H_z$ و شدت مؤثر آن ۱ آمپر است چیست؟

۲- می‌دانیم مقدارمتوسط یك تابع‌سینوسی به‌صورت $y = y_m \sin \frac{2\pi}{T} t$ در مــدت یــك آلترنانس($\frac{T}{2}$) برابر$\frac{2y_m}{\pi}$است. براین اساس، مقدار الکتریسیته‌ای‌که توسط یك جریان متناوب به تواتر ۵۰ هرتز و به‌شدت مؤثر۴/۴۵ آمپر درمدت یك آلترنانس انتقال می‌یابد چه اندازه است؟

جواب: تقریباً ۰/۰۴ کولن

۳- چه شدت جریانی ازیك سیم‌پیچ که ضریب خودالقائی آن ۳۵/۵ میلی‌هانری است باید بگذرد تا انرژی الکتریکی ذخیره‌شده درآن برابر$۵/۵۰ \times ۱۰^{-۲}$ ژول بشود؟

جواب: ۱/۷۶A

۴- هرگاه به دوسر سیم‌پیچ یــك آخنربای الکتریکی اختلاف پتانسیل پیوسته ۱۲۰ ولت برقرار سازیم جریانی به‌شدت ۱۲ آمپر ازآن می‌گذرد. ولی اگر به‌دوسر همین سیم‌پیچ‌اختلاف پتانسیل متناوبی کــه مقدار مؤثر آن ۱۲۰ ولت و فرکانس آن ۵۰ هــرتز است ببندیم شدت جریان درسیم‌پیچ ۵ آمپر می‌شود. اندوکتانس سیم‌پیچ واختلاف فازبین شدت واختلاف‌پتانسیل جریان متناوب را حساب‌کنید.

جواب: تقریباً ۰/۰۷ هانری و تقریباً °۶۵

۵- مداری که شامل یك لامپ (به‌مقاومت ۳۰۰ اهــم درحال روشن بودن) ویك خازن است به‌شبکه یك‌جریان متناوب ($V_e = ۱۲۰$ ولت و$f = ۵۰$ هرتز) متصل است وشدت‌جریان مؤثر درمدار ۰/۲۴ آمپر است. ظرفیت خازن را حساب‌کنید ومعادله‌شدت جریان‌رابنویسید.

جواب: $C = ۸\mu F$ و $i = ۰/۳۴ \sin(۳۱۴t + ۰/۹۳)$

۶- یك خازن به‌ظرفیت ۵۰/۰ میکروفاراد و یك مقاومت ۴۵/۰ اهم ویك سیم‌پیچ به اندوکتانس ۱۵۰/۰هانری به‌طور متوالی بهم بسته شده‌اند وبین دوسر این مدارجریان‌متناوبی که‌اختلاف پتانسیل مؤثر آن ۲۰۸/۰ ولت وفرکانس آن ۶۰/۰ هرتز است برقرار شده است، مطلوبست:

۱- مقاومت ظاهری (امپدانس) مدار

۲- شدت جریان مؤثر درمدار

جواب: ۴۵/۱ اهم و ۴/۶۱ آمپر

۷- مداری تشکیل شده است ازیك سیم‌پیچ (به‌مقاومت R و به‌ضریب خود القایی L) و یك خازن به‌ظرفیت C که به‌طور متوالی بهم بسته شده‌اند و از مدار جریان متناوبی که‌شدت مؤثر آن ۰/۲ آمپر است می‌گذرد. ولت‌سنج اختلاف پتانسیل قسمتهای مختلف مدار رابشرح زیرمعین می‌کند:

اختلاف پتانسیل درسر مدار ۱۲۰ ولت

اختلاف پتانسیل دوسر سیم‌پیچ ۱۶۰ ولت

اختلاف پتانسیل دوسر خازن ۵۶ ولت

اولاً- مقاومتهای ظاهری سیم‌پیچ و خازن را جداگانه حساب کنید.

ثانیاً- مقاومت R سیم‌پیچ را معین نمائید.

ثالثاً- اختلاف فاز بین شدت جریان واختلاف پتانسیل کل دوسر مدار را حساب کنید.

جواب: ۱) ۸۰۰ اهم و ۲۸۰ اهم ۲) ۴۸۰ اهم ۳) تقریباً ۰/۶۴ رادیان.

پاسخ به‌پرسشهای متن بخش ۱۳

۱۳-۱)- اندازه شدت جریان درمدار درلحظات $\frac{T}{4}$ و $3\frac{T}{4}$ ماکزیموم و درلحظات صفر و $\frac{T}{2}$ و T صفر است.

۱۳-۲)- جرم جسمی‌که در عمل الکترولیز درکاتد آزاد می‌شود طبق قانون فارادی با عوامل زیر متناسب است:

۱- مقدار الکتریسیته‌ای‌که از الکترولیت می‌گذرد

۲- هم‌ارز الکترو شیمیائی جسم.

۱۳-۳)- با یکسوکردن جریان متناوب بوسیله لامپ دوقطبی یا بوسیله دیگر.

۱۳-۴)- از رابطه $F=BIl_m \sin\omega t$ که درآن B شدت میدان و l طول قسمت متحرك و i شدت جریان لحظه‌ای است. ماکزیموم این نیرو برابر است با:

$$F_m=BlI_m$$

۱۳-۵)- به‌وسیله سیم‌پیچ خودالقا (که هسته آهنی نیز دارد). زیرا در سیم‌پیچ خودالقاء انرژی خیلی‌کم به‌صورت گرما تلف می‌شود درصورتی‌که در رئوستا به‌علت مقاومت الکتریکی که دارد مقدار زیادی از انرژی الکتریکی تلف می‌شود.

۱۳-۶)- رابطه $I_e=\frac{V_e}{X_L}=\frac{V_e}{L\omega}$

۱۳-۷)- دریك‌آلترنانس به‌صورت $\frac{1}{2}CV_e^2$ در خازن ذخیره و در آلترنانس بعد به‌مدار بازگردانده می‌شود.

۱۳-۸)- اگر مقاومت‌سلف ناچیز نباشد $(R_L\neq 0)$ خواهیم داشت:

$$Z_L=\sqrt{R_L^2+X_L^2}=\sqrt{R_L^2+L^2\omega^2} \qquad (۱۳-۳۵)$$

بنابراین: $$V_L=I_eZ_L=I_e\sqrt{R_L^2+L^2\omega^2} \qquad (۱۳-۳۶)$$

دراین $\frac{\pi}{2}>\varphi>0$ است واز رابطه زیر حساب می‌شود:

$$tg\varphi=\frac{X_L}{R_L}=\frac{L\omega}{R_L} \qquad (۱۳-۳۷)$$

یادآوری- رابطه ۱۳-۳۵ را می‌توان از رابطه کلی $Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_c)^2}$ نتیجه‌گرفت. کافی است قرار دهیم: $X_c=0$ و $R=R_L$.

۱۳-۹)- نه. اختلاف پتانسیل کل دو سر مدار معمولاً کوچکتر از مجموع اختلاف پتانسیلهای دوسر هریك از اجزاء است یعنی:

$$V_e<V_R+V_L+C_c$$

می‌توانیم مانند (شکل۱۳-۱۸) اختلاف پتانسیل‌کل را از راه رسم به‌دست آوریم. بین اختلاف‌پتانسیل‌کل و اختلاف‌پتانسیلهای دوسر هریك‌ازاجزاء مدار رابطه‌جبری زیر برقرار است:

$$V_e^2=V_R^2+(V_L-V_c)^2$$

۱۴

نور

درقلمروِوسیع دانش فیزیك، نوروپدیده‌های گوناگون‌آن‌همواره مورد توجه انسان بوده است. بررسی پدیده‌های نور به این جهت جلب توجه کرده است که نتایج حاصل از آزمایشهای مربوط به‌آن، مثلا تجزیه نور به رنگهای مختلف، با چشم دیده می‌شوند. علاوه براین بررسی تکامل تدریجی فرضیه‌ها و نظریه‌های دانشمندان درباره نورکه منجربه‌کشف خواص آن ووضع قوانین مختلف گردیده است نیزبه نوبه خودجالب ودارای اهمیت است .

درباره‌کشف وشناخت خواص نورآزمایشهای بسیاری انجام شده است‌که هر دسته از آنها معرف یکی‌ازویژگیهای نوراست. ازاین روخواص نور، بسته به چگونگی رفتارآن تحت سه عنوان اپتیك‌ـ هندسی (مشتمل برانتشار نوربه‌خط راست، محدودبودن سرعت‌نور، بازتابش‌وشکست‌نور) اپتیك‌فیزیك (شامل‌تفرق،تداخل،پلاریزاسیون و شکست مضاعف نور) و اپتیك‌کوانتیك (شامل پدیده فتوالکتریك، تابش نور از اتم و...) مورد بررسی قرار می‌گیرد. شما درکتاب فیزیك سال دوم با رفتار نور براساس انتشار آن به خط راست آشنا شده‌اید و در این‌جا نیازی به تکرار آن مطالب نیست. در این‌جا نخست با روش اندازه‌گیری سرعت نور آشنا خواهید شد سپس پدیده‌های تفرق و تداخل و پلاریزاسیون راکه معرف رفتار موجی نور هستند خواهید دید و مختصری هم رفتار ذره‌ای نور را خواهید آموخت .

اندازه‌گیری سرعت نور

پیش‌از قرن نوزدهم میلادی درمدت دوهزار سال عقیده براین بودکه سرعت انتشار نورنامحدود وبی‌نهایت است یعنی اگر دریکی از ستارگان دور

حادثه بزرگی رخ دهد وقوع آن حادثه درنقاط‌دیگر جهان هستی آناً دیده می‌شود. گالیله برای اندازه‌گیری سرعت نورتلاش کرد ولی موفق‌نشد، این دانشمند که یکی ازپایه‌گذاران فیزیك تجربی است به‌کمك همکارخود پس از چندین بار تمرین و کسب مهارت لازم، آزمایشی را به‌این ترتیب انجام داد که خودبالای تپه‌ای ایستاد وفانوس روشنی را به دست گرفت وهمکاراو با یك فانوس روشن دیگر، در فاصله نسبتاً دوربالای تپه دیگری ایستاد. روش آزمایش این بودکه هر دونفر روی فانوسهای خود را با پارچه تیره‌ای پوشانده بودند وگالیله باکنار زدن پارچه در یك مدت‌کوتاه، یك علامت نوری می‌فرستاد وهمکار اوبه محض مشاهده علامت‌نوری باکنارزدن پارچه ازروی فانوس خود در یك زمان کوتاه با علامت نوری دیگری به گالیله پاسخ می‌داد. گالیله با وجود انجام‌آزمایشهای مکرر در فواصل مختلف نتوانست اختلاف زمانی بین‌دوپیام مشاهده‌کندونتیجه‌آزمایش خودرا چنین‌اظهارداشت: اگر سرعت نور نامحدود نباشد بسیارزیاد است.

پرسش ۱۴-۱- چراگالیله در این آزمایش ناموفق‌بود؟

پرسش ۱۴-۲- چرا نخستین‌نتایجی که‌درباره سرعت‌انتشارنوربدست آمدازمشاهدات‌نجومی (مثلا توسط رومر) بودنه ازمشاهدات زمینی ؟

در سال ۱۸۴۹ میلادی، فیزو[1] فیزیك دان فرانسوی با روش ابداعی خود توانست سرعت‌نور را بدون این‌که احتیاجی به اندازه‌گیریهای نجومی باشد، درسطح زمین اندازه بگیرد.

شکل۱۴-۱، طرزآزمایش فیزو و وسایلی را که در این‌آزمایش به‌کار رفته است نشان می‌دهد: پرتوهای نور ازچشمه S به‌آینه شفاف G که هم‌نور را منعکس می‌کند وهم ازخودعبور می‌دهد می‌تابد وپس‌ازبازتابش ازروی آن توسط عدسی L_1 درنقطه O متمرکزمی‌شودوتوسط عدسی L_2 به‌صورت‌دسته پرتوموازی درمی‌آید. این دسته پرتوموازی پس‌از پیمودن مسافت ۸/۶۷ کیلومتر به عدسی L_3 و آینه M که بالای تپه‌ای قرار داده شده است می‌تابد وپس‌ازبازتابش ازروی این‌آینه دوباره برمی‌گردد ودرنقطه E به چشم ناظرمی‌رسد.

چرخ دندانه‌داری‌که میان دوعدسی L_1وL_2 قرار داده شده به این منظور است که به هنگام چرخیدن، پرتوهای نور را به صورت آذرخشهای متوالی وهم‌زمان به سوی‌آینه M گسیل دارد و به این وسیله بتوان زمان رفت وبرگشت هرآذرخش را اندازه‌گرفت؛ درنظر بگیریم‌که چرخ ساکن است و نور درنقطه O ازفاصله میان دودندانه چرخ به‌آینه M می‌تابد. بدیهی است ناظرE تصویرچشمه‌نورS را درآینه می‌بیند. اگرچرخ به‌گردش درآیدوسرعت دوران آن‌طوری باشدکه نوری‌که در نقطه O از میان دو دندانه می‌گذرد، درموقع برگشت، درست به دندانه a برخوردکند، نوری هم‌که از میان دو دندانه بعدی می‌گذرد، در برگشت به دندانه b برخورد می‌کند... دراین‌صورت نور به چشم ناظر نمی‌رسد وتصویر تاریك است. اگر سرعت دوران

۱- Armand Fizeau (۱۸۱۹ - ۱۸۹۶ میلادی)، فیزیك دان فرانسوی. این دانشمند ازجمله‌کسانی است‌که زندگی خودرا وقف تحقیقات علمی کرده‌اند.

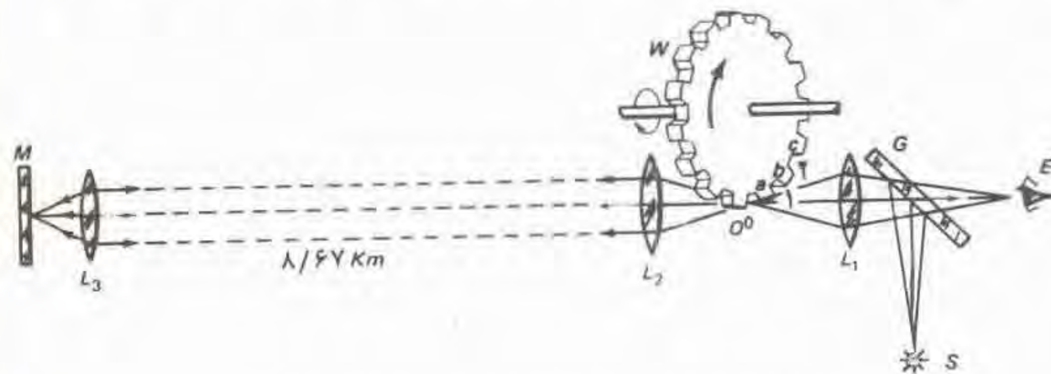
چرخ به تدریج افزوده شود روشنایی تصویر کم‌کم ظاهر می‌شود وبتدریج افزایش می‌یابدتا به‌ماکزیمم شدت خـودبرسد. درایـن حالت آذرخشهایی که به ترتیب ازفاصله‌های ۰و۱و۲و۳و... دندانه‌ها گسیل می‌شوند، درست‌درزمانی برمی‌گردند که‌ازفاصله‌های ۱و۲و۳و۴و... دندانه‌ها بگذرند و بـه چشم ناظر برسند. چرخ دندانه‌داری کـه فیزوبه کاربرد دارای ۷۲۰ دندانه بود $(p = ۷۲۰)$ و هنگامی که آن را با سرعت ۲۵ دور درثانیه $(n = ۲۵)$ می‌چرخـاند تصویر S در نقطه E به طورواضح دیـده می‌شد. بنابراین زمان رفت وبرگشت نوربا توجه به‌اعداد بـالا برابر

$$\frac{۱}{pn} = \frac{۱}{۷۲۰ \times ۲۵} = \frac{۱}{۱۸۰۰۰}$$

ثانیه بـود ونور در این مـدت مسافت رفت و بـرگشت ۸/۶۷ × ۲ = ۱۷/۳۴ کیلومتر را می‌پیمود، بااین مشخصات فیزو سرعت نـور را درحدود ۳۱۳۰۰۰ کیلومتر برثانیه به دست آورد.

پس ازاعلام آزمایش فیزو، دانشمندان دیگر برای اندازه‌گیری سرعت نور و اصلاح روش فیزو آزمایشهای دقیق‌تـری انجام دادند از جمله فوکو دانشمند دیگرفرانسوی که‌بافیزو هم‌زمان بودبه‌جای چرخ دندانه‌دار ازآینه چرخان استفاده کـرد، سپس مایکلسون[۱] دانشمند امریکایی بـا استفاده از آینه چرخان، به شکل منشور هشت‌وجه چندین آزمایش برای تعیین سرعت نورانجام دادکه نخستین‌آنها در سال ۱۸۸۰ میلادی و آخریـن آنها درسال ۱۹۲۶ میلادی (یعنی دریك دوره ۴۵ساله) انجام گرفت و سرعت نوررا ۲۹۹۷۹۶ کیلومتر برثانیه اعلام‌کرد.

در چهل سال اخیر آزمـایشهای زیـادی بـا روشهای‌مختلف برای اندازه‌گیری سرعت نورانجام شده وپس ازبررسیهای دقیق درسال ۱۹۶۴ میلادی بهترین مقدار برای سرعت نور درهوا برابر:



شکل ۱۴-۱ طرح آزمایش فیزو برای اندازه‌گیری سرعت نور

۱- Albert A. Michelson (۱۸۵۲-۱۹۳۱ میلادی). مخترع دستگـاهـی بنـام تداخل‌سنج (Interferometer). وبا همین‌دستگاه است که می‌توان طول مترا ستاندارد را برحسب طول موج نورمشخص کرد. اونخستین دانشمند امریکایی است که درسال ۱۹۰۷ میلادی‌موفق به‌دریافت جایزه نوبل شده است.

$$c = (۲۹۹۷۹۲/۵ \pm ۰/۳)\frac{km}{s} \quad (۱-۱۴)$$

انتخاب گردیده است[1]. ولی عملاً درمحاسبات سرعت نوررا درهوا یا درخلاء برابر $c = ۳/۰ \times ۱۰^{۸}\frac{m}{s}$ می‌گیرند.

سرعت نور درهوا اندکی کمتر ازسرعت آن در خلاء است. این اختلاف درسطح ترازدریا درحدود ۷۰ کیلومتر برثانیه ودرنقاط مرتفع که هوا رقیقتر است ازاین مقدار هم کمتر است. ولی دربیشتر موارد ازاین اختلاف صرف‌نظر می‌کنند وسرعت نور را در خلاء ودرهوا با هم برابر می‌گیرند.

سرعت انتشار نور در مواد شفاف

سرعت انتشارنور دریك مادهٔشفاف که ضریب شکست آن نسبت‌به خلاء یا نسبت به هوا n است، چنان که می‌دانیم[2] برابر است با:

$$\boxed{V = \frac{c}{n}} \quad (۲-۱۴)$$

این رابطه نشان می‌دهدکه وقتی نورازخلاء یا از هوا وارد محیط شفافی مانند آب یا شیشه می‌شود سرعتش کاهش می‌یابدودرنتیجه شکست حاصل می‌کند. این رابطه که براساس نظریه موجی بودن نورتوجیه می‌شود نخستین‌بار با اندازه‌گیری سرعت نوردرآب توسط فوکو به‌طور تجربی به‌اثبات رسید. آزمایش فوکو دربارهٔ اندازه‌گیری سرعت نور در آب که در سال ۱۸۵۰ میلادی انجام شدآزمایشی قاطع و پرارزش بودکه به جربحثهای چندین ساله پیروان نظریه ذره‌ای نیوتن و نظریه موجی هویگنس درباره نور پایان دادچندسال بعد مایکلسون نیزسرعت نور را درآب اندازه‌گرفت و مقدار ۲۲۵۰۰۰ کیلومتر برثانیه را به دست آورد.

پرسش ۱۴-۳- به نظرشما، چرا نظریه ذره‌ای نیوتن در باره نور نمی‌توانست همهٔ وجوه شکست نوررا دریك محیط شفاف توجیه کند؟

پرسش ۱۴-۴- با توجه به رفتارموجی نور بگوئیدوقتی نورازهوا واردآب می‌شود چه تغییری درسرعت وطول موج وتواتر آن پدیدمی‌آید؟

پرسش ۱۴-۵- چرا نور سفید در منشور تجزیه می‌شود؟

تفرق نور

میدانیم نورهنگام برخوردبه‌لبه‌های اجسام از مسیرراست خودمنحرف می‌شود. یعنی رفتار نوردر برخورد به لبه‌های اجسام مانند رفتارموجهای آب یا صوت است که از گرداگرد لبه‌های مانع واقع در مسیر خودمی‌گذرند. این پدیده را چنان‌که دیدیم تفرق یا دیفراکسیون نور می‌نامند برای مشاهده پدیده تفرق کافی است که‌دریك اتاق تاریك،درمسیر پرتوهای نوری‌که ازیك‌نقطه نورانی (مثلا ازیك روزنه کوچك) گسیل می‌شوند جسم کدر کوچکی را قرار دهیم وسایه‌آن را روی یك پرده سفید بررسی کنیم. آثار تفرق معمولا به صورت آشفتگی درمرز سایه ظاهر می‌گردند.

۱ـ سرعت نوررا درخلاء چنان‌که‌متداول است دراینجا به c نمایش داده‌ایم که‌حرف‌اول کلمهٔ Celerity است.

۲ـ به‌کتاب فیزیك سال دوم بخش شکست نور مراجعه شود.



شکل۱۴-۲- سایه چندجسم کوچك که آثارتفرق درلبه‌های آنها به صورت نوارهای باریکی مشاهده می‌شود .

شکل (۱۴-۲) سایه چند جسم‌راکه‌آثارتفرق در لبه‌های آنها مشاهده می‌شود نشان می‌دهد به‌ـ طوری‌که درشکل دیده می‌شود اثرهـای تفرق به‌ـ صورت نوارهای باریکی درمرزهای سایه ظاهر شده است ودروسط دوتـا ازاین سایه‌ها نوارهـای تفرق به‌صورت دایره‌های هم‌مرکز دیده می‌شود .

پدیده تفرق در زمان نیوتن با این فرض که نور از ذرات ریزی تشکیل یافته وحرکت‌آنها تابع قوانین معمولی مکانیك است توجیه می‌شد ، زیـرا چنان‌که گفتیم نیوتن معتقد بودکه نور بـه صورت ذرات بسیارکوچك با سرعت بسیارزیاد ازمنبع‌تولید نـور درتمام جهات پخش می‌شود . نظریـه نیوتن درباره نور، به‌سبب شخصیت ممتاز او، سالها حتی تا اوایل قرن نوزدهـم میلادی مـورد قبول بیشتر فیزیکدانان‌آن‌زمان بود. ولی با ظهور نظریه‌موجی نـور وکشف پدیده‌هائی مـانند تفرق ، تـداخل و پلاریزاسیون نورکه‌به کمك این نظریه به‌طور کاملتر ودقیقتری توجیه‌می‌شوندکم کم نظریه ذره‌ای‌بودن نور رها شد و نظریه موجی بودن نور جای آن را گرفت وبراساس این نظریه ، پدیده‌هـای اصلی نور مانندبازتابش،شکست، تفرق، تداخل‌وپلاریزاسیون درآغاز قرن‌نوزدهم‌میلادی به‌وسیله فرنل (فیزیك‌ـ دان فرانسوی‌که با نام‌اوآشنایی دارید) باروشهای ریاضی نیزاستدلال شد .

تئوری موجی‌نورنخست‌درسال۱۶۶۵میلادی به وسیله رابرت هـوك[1] فیزیك‌دان انگلیسی مطرح شدوچندسال بعدتوسط‌کریستیان هویگنس فیزیك‌دان واخترشناس هلندی به‌صورت‌کاملتری بیان‌گردید . برطبق این تئوری، نورمانند صوت‌به‌صورت‌امواج کروی منتشرمی‌شود .

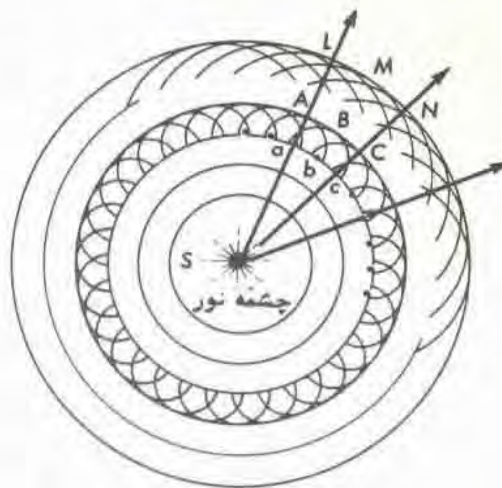
اصل هویگنس

تئوری موجی هویگنس راکه به صورت رسم هندسی مجسم مـی‌شود اصل هویگنس می‌نـامند و چنین بیان می‌شود:

هرنقطه واقع برجبهه یك موج را می‌توان در حکم منبع جدید تولید امواج کروی دیگری در نظر گرفت. پس‌اززمان t، جبهه جدید موج سطح مماس براین موجهای ثانویه خواهدبود.

مثلا درشکل (۱۴-۳) همهٔ نقاطی‌مانند a و b و c و ... که دریك‌لحظه برجبهه‌موج واقعندممکن است ماننددچشمه S رفتارکرده وامواج کروی‌کوچك ثانوی با هم تـولید کنند . پـوش این مـوجهای کروی ثانویه، یا به عبارت دیگرسطح مماس برآنها جبهه جدیدموج‌خواهدبود. لحظه‌ای بعدممکن‌است نقاط A وB وC و... واردعمل شوند ولحظه‌ای‌دیگر

1– Robert Hooke



شکل ۱۴-۳- نمایش اصل هویگنس

نقاط L و M و N و... تاآخر.

اصل هویگنس درنظر اول ممکن است به‌صورت یك‌بازی بی‌ثمربادایره‌ها جلوه گرشود، ولی به‌کمك همین اصل می‌توان بسیاری از پدیده‌های اپتیکی را توجیه وتفسیر کرد. مثلا درشکل (۱۴-۴) اصل هویگنس با یك‌آزمایش ساده نشان داده شده است: امواج تختی که ازسمت چپ به‌مانع AB می‌رسنددر تمام نقاط این مانع به جزنقطه S، یاجذب‌می‌شوندو یا بازتابش حاصل می‌کنند ولی نقطه S بنا به اصل هویگنس مانندیك‌منبع تولیدموج ثانه به‌عمل‌می‌کند وپدیده‌تفرق‌ظاهرمی‌شود. این‌پدیده به‌خوبی‌برسطح آب دیده می‌شود.

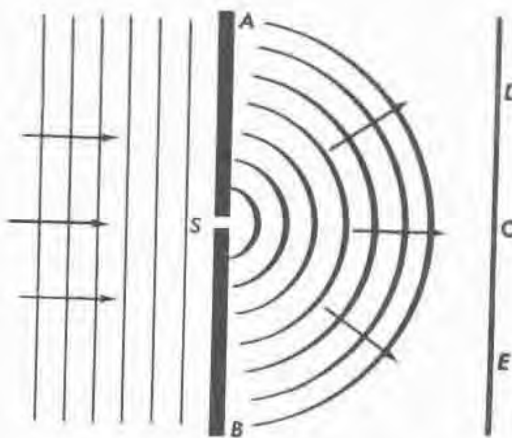
اگرمانع AB یك پرده‌کدر وسوراخ S، یك روزنه خیلی کوچك (مثلا سوراخی که‌باسوزن‌سنجاق تولید می‌شود) باشد هرگاه نوربه‌آن بتابد امـواج نوربه‌صورت نیمکره‌هائی که مرکزهمه‌آنها روزنه S است ازروزنه به اطراف پخش می‌شوند.

پرسش ۱۴-۶- اگرروزنه S یك شکاف‌باریك ودراز (مثلا عمود برصفحه کتاب) باشد به نظر شما جبهه امواج نوری که ازاین شکاف‌پخش می‌شوندچه شکلی خواهد داشت؟

پرسش ۱۴-۷- بااستفاده‌ازاصل‌هویگنس‌بگوئید چرا لبه‌سایه‌ها درشکل (۱۴-۲) کاملا واضح‌نیست؟

تداخل امواج نوری

دربخش یازدهم دیدیم هرگاه دومنبع‌ارتعاشی هم پرید وهم دامنه دریك محیط به‌طورمنظم با هم به ارتعاش درآیند امـواج حاصل از ارتعاش منظم آنهـا ضمن انتشار درمحیط در یکدیگر داخـل شده پدیده تداخل را ایجاد می‌کنند. درآن بخش متذکر شدیم که تداخل امـواج یك پدیده عمومی است، یعنی هرجا دومنبع ارتعاشی هم‌فاز وهم پرید وجود داشته باشد این پدیده صورت می‌گیرد. نمونه‌هایی ازپدیده تداخل را درسطح آب ودرطـول یك طناب (به‌صورت‌امواج ایستاده)وهم‌چنین درصوت بررسی کردیم. اینك‌یادآورمی‌شویم که پدیده تداخل‌درنور



شکل ۱۴-۴- پدیده تفرق امواج ازیك سوراخ کوچك معرف اصل هـویگنس است

هم مشاهده می‌شود و مؤید نظریه موجی بودن نور است. باید توجه داشت که شرط این‌که طیف تداخلی حاصل ازدومنبع ارتعاشی وضع ثابت ومشخصی داشته باشد این است که ارتعاشات حاصل ازدومنبع ارتعاش هم‌پرید وهم‌فاز باشند، دراین‌صورت می‌گوئیم دو منبع همسان (کوهرنت[1]) یا دارای خاصیت همسانی (کوهرنس[2]) هستند.

درتولید پدیده تداخل برسطح آب (درطشت موج‌نما) دیدیم که چگونه می‌توان دومنبع ارتعاشی همسان ایجادکرد[3]. برای مشاهده پدیده تداخل در امواج نورانی نیز دوچشمه نور همسان لازم است دوچشمه نورهمسان را فقط می‌توان ازیك منبع نور به‌دست‌آورد(مثلاصفحه کدری راکه درآن‌دوسوراخ ریزیا دوشکاف موازی باریك نزدیك‌به‌هم فراهم‌شده است جلویك لامپ روشن قرار داد). آزمایش نشان می‌دهد که ایجاد پدیده تداخل در وضعی پایدار و مشخص به‌وسیله دوچشمه‌مستقل نور، (مثلادورشته ملتهب‌دولامپ‌جداگانه‌وپهلوی‌هم) غیرممکن‌است. علت این است که انتشار نور ازیك چشمه مولد نور دارای‌طبیعت اتصالی‌نیست بلکه‌یك «پدیدهٔ اتفاقی» است که در آن تغییرات ناگهانی فاز در زمانهای بسیارکوتاه (درحدود $۱۰^{-۸}$ ثانیه) صورت می‌گیرد. گرچه ممکن است با دوچشمه مستقل آثار تداخل درزمانهای کوتاه ظاهرشود ولی شکل ووضعیت آنها درهرلحظه تغییرمی‌کندوآن‌چه دیده می‌شودتغییرفاز است نه نوارهای تداخلی. بنابراین برای این‌که پدیده تداخل با وضعی پایدار درمدتی دراز حاصل شود باید اختلاف فازبین نقاط متناظر دردوچشمه نورهمواره ثابت بماند. به‌عبارت دیگر، نقاط‌مختلف دوچشمه نظیر به‌نظیر باهم ارتباط فازداشته باشند، دراین‌صورت دوچشمه همسان یاکوهرنت هستند.

آزمایش یانگ[4] ـ تعیین طول موج نور

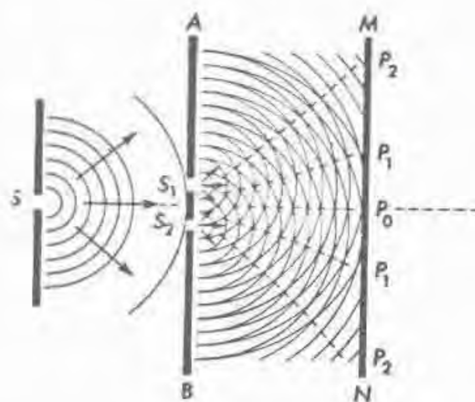
آزمایش‌یانگ که‌برای‌نشان‌دادن خاصیت‌موجی‌بودن نور طرح ریزی شده بود در سال ۱۸۰۱ میلادی با استفاده‌ازنورخورشیدودوسوراخ‌ریزانجام‌شد. طرح این‌آزمایش درشکل(۱۴ـ۵) نمایش داده شده است: نورخورشید ازروزنه S می‌گذرد وبه دوسوراخ‌ریز S_1 و S_2 می‌تابد و آنها را روشن می‌سازد این سوراخها طبق اصل هویگنس، خود درحکم‌دوچشمه همسان نورهستندکه دو دسته موجهای‌کروی‌شکل منتشر می‌سازند . این موجها با یك دیگر تداخل

۱ـ Coherent

۲ـ Coherence

۳ـ به بخش ۱۱ تداخل امواج مراجعه شود .

۴ـ Thomas young (۱۷۷۳ـ۱۸۲۹ میلادی) ـ دانشمند انگلیسی که درسن ۱۴ سالگی‌زبانهای لاتین، فرانسه، ایتالیائی، یونانی، عبری، عربی وفارسی را فراگرفت. سپس‌به‌تحصیل پزشکی پرداخت ودرضمن تحصیل پزشکی مطالعات اساسی روی چشم به ویژه اثرسه‌رنگ قرمزوسبز وبنفش روی چشم انجام داد. درموردمکانیسم صدای انسان نیزمطالعاتی‌انجام دادکه اورا به‌آموختن صوت وامواج صوتی علاقمند ساخت. سپس متوجه اپتیك شد ونشان دادکه بسیاری ازآزمایشهای نیوتن درباره نور را می‌توان با تئوری موجی نور به‌آسانی توجیه‌کرد. یانگ را بدون‌شك بایددر ردیف دانشمندان برجسته به شمارآورد .

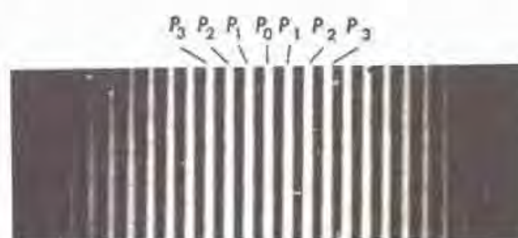


شکل۱۴–۵- آزمایش یانگ با دو شکاف برای نشان دادن پدیده تداخل امواج نور

می‌کنند وطیف تداخلی برروی پرده MN تشکیل می‌شود .

امروزه در آزمایشگاهها به جای دو سوراخ S_1 و S_2 ازدوشکاف باریك وموازی ونزدیك‌به‌هم استفاده می‌شود ونور نیز از یك شکاف S برآنها می‌تابد. دراین‌صورت‌طیف تداخلی به‌شکل‌نوارهای هم‌عرض یك درمیان روشن و تاریك برروی صفحه MN که موازی با صفحه دوشکاف S_1 و S_2 است تشکیل می‌گردد .

شکل (۱۴–۶) منظره واقعی از یك طیف تداخلی امواج نور را نشان می‌دهد که از آزمایش



شکل۱۴–۶- نوارهای تداخلی حاصل ازدوشکاف در آزمایش یانگ

یانگ بادوشکاف به‌دست آمده است ونوارهای روشن، مربوط به‌نقاط P_0 و P_1 و P_2 و... درشکل (۱۴–۵) هستند. این پدیده را برطبق اصل هویگنس می‌توان چنین‌توجیه‌کرد. امواجی‌که ازنقاط مختلف‌شکافهای S_1 و S_2 باهم منتشر می‌شوند فقط درنقاط واقع برروی خطوط نقطه چین‌که درشکل(۱۴–۵) نمایش داده شده‌است‌یك دیگررا تلاقی می‌کنند. این خطوط درواقع‌معرف‌سطوحی هستند، که هردوموج‌درحالتی که همفازندباهم به‌آنجا می‌رسندودرنتیجه‌ماکزیموم روشنائی را ایجاد می‌کنند. دروسط فاصله این‌خطوط امواج درفاز متقابل به‌هم می‌رسند ودر نتیجه اثر یك‌دیگر را خنثی می‌کنند وتاریکی حاصل می‌شود. بنابراین تداخل امواج‌نورانی شبیه به‌تداخل‌امواج برسطح‌آب‌است که درشکلهای (۱۱–۸) و(۱۱–۱۱) دربخش۱۱ دیده می‌شود .

نوارهای روشن مکان هندسی نقاطی هستند که تفاضل فاصله‌های آنها ازدوشکاف S_1 و S_2برابر مضرب درستی از طول موج λ است و نوارهای تاریك نیز مکان هندسی نقاطی هستندکه اختلاف فاصله‌های آنها ازدو شکاف S_1 و S_2 برابر مضرب فردی ازنصف طول موج است .

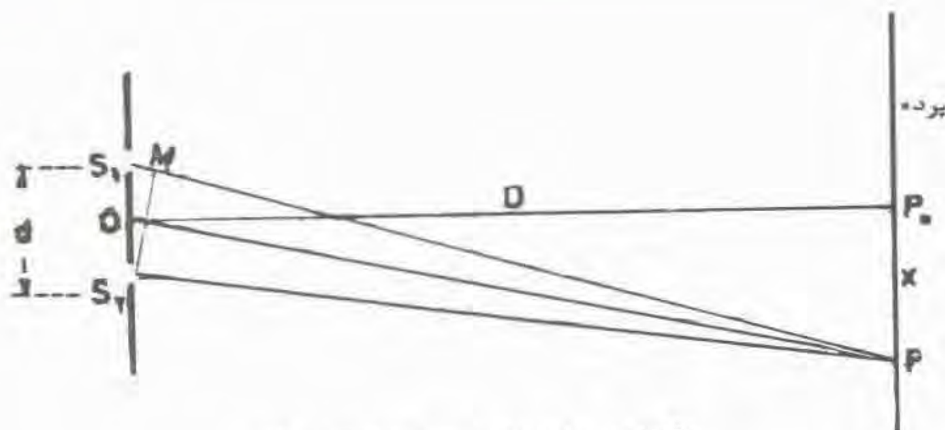
محاسبه طول موج نور

درنظر بگیریم‌که دو شکاف S_1 و S_2 توسط منبع نورتك‌رنگی با طول موج λروشن شده‌اند و طیف تداخلی روی پرده نسبتاً دور و موازی با دو شکاف S_1 و S_2 تشکیل گردیده است.

اگر مطابق شکل ۱۴–۷ :

$d = S_1S_2$ فاصله دوشکاف ازیك دیگر ،

$D = OP_0$ فاصله پرده ازصفحه دوشکاف ،



شکل۱۴-۷- محاسبه طول موج نور با آزمایش یانگ

$x = P_0P$ فاصله یك نوار روشن K ام از نوار روشن وسطی P_0 باشد طبق آن چه در بخش ۱۱ ضمن محاسبه طول موج دیدیم خواهیم داشت:

$$\boxed{\lambda = \frac{xd}{KD}} \qquad (۱۴-۲)$$

با اندازه‌گیری x و d و D طول موج λ حساب می‌شود.

نوار مرکزی P_0 مکان نقاطی است که اختلاف راه میان موجهائی که از S_1 و S_2 به این نقاط می‌رسند صفر است. (یعنی $S_1M = K\lambda = ۰$ در نتیجه $K = ۰$). برای نخستین نوارهای روشن در دوطرف نوارمرکزی $K = ۱$ است و برای دومین و سومین و... نوارروشن K به‌ترتیب برابر ۲و۳و... است.

نوارهای تاریك، چنان‌که بیان شد مکان نقاطی هستند که موجهای نوراز دوشکاف S_1 و S_2 با فاز متقابل به‌آن نقاط می‌رسند به‌عبارت‌دیگر اختلاف راه میان این موجها مضرب فردی از $\frac{\lambda}{۲}$ است. مثلا برای نوار تاریکی که بعداز نوار روشن K ام واقع است داریم

$$S_1M = (۲K + ۱)\frac{\lambda}{۲}$$

اگر فاصله این نوار تاریك را ازنوار روشن مرکزی به x' نمایش دهیم با توجه به این‌که $S_1M = \frac{x'd}{D}$ است خواهیم داشت:

$$\boxed{(۲k + ۱)\frac{\lambda}{۲} = \frac{x'd}{D}} \qquad (۱۴-۴)$$

رابطه (۱۴-۳) نشان می‌دهد که فاصله هر نوار روشن ازنوار مرکزی (یعنی x) با طول موج λ نسبت مستقیم و با فاصله دو شکاف از یکدیگر (یعنی d) نسبت معکوس دارد بنابراین هرچه طول موج بزرگتر وفاصله دوشکاف ازیك دیگر کمتر باشد x بزرگتر ودرنتیجه پهنای نوارها بیشتراست.

مثال – دانش‌آموزی‌دریك آزمایشگاه‌آزمایش یانگ را با مشخصات زیرتکرار می‌کند:

فاصله دوشکاف ازهم ۰/۵۶۰ میلیمتر،

فاصله میان دو نوار روشن متوالی ۰/۹۸۰ میلیمتر،

فاصله میان صفحه دوشکاف از صفحه‌ای که نوارهای تداخلی بر روی آن تشکیل می‌شوند ۸۲/۶ سانتیمتر. طول موج نوری که دراین آزمایش به کار رفته چه اندازه است؟

ـ داریم: $d = ۵/۶۰ \times ۱۰^{-۴}m$ و

$D = ۰/۸۲۶m$

چون پهنای همه نوارها یکی است فاصله میان دو نوار روشن متوالی را می‌توان برابر فاصله وسط نوار روشن اول ازنوارمرکزی گرفت، دراین‌صورت

$K = ۱$ و $x = ۹/۸۰ \times ۱۰^{-۴}m$

وخواهیم داشت:

$$\lambda = \frac{xd}{KD} = \frac{۹/۸ \times ۱۰^{-۴} \times ۵/۶ \times ۱۰^{-۴}}{۱ \times ۰/۸۲۶} \simeq ۶۶/۴ \times ۱۰^{-۸}m$$

یا

$$\lambda \simeq ۶۶۴۰ \times ۱۰^{-۱۰}m$$

آنگستروم[1]، واحد طول موج نور

چون‌طول‌موج نور خیلی کوتاه است فیزیک‌دانان برای بیان‌اندازه آن واحدخیلی‌کوچکی به‌نام آنگستروم (باعلامت‌اختصاری $Å$) انتخاب کرده‌اند که اندازه‌آن $۱۰^{-۷}$ میلیمتریا $۱۰^{-۱۰}$ متراست‌یعنی:

$$۱Å = ۱۰^{-۱۰}m \qquad (۵-۱۴)$$

درجدول زیر طول موج رنگهای طیف نور سفید تا دورقم معنی‌دار برحسب آنگستروم داده‌شده است واین طول موجها مربوط به قسمت وسط هر یک‌ازنوارهای رنگی طیف است. بدیهی‌است تواتر مربوط به‌هریک‌ازاین طول موجها ازرابطه $C = f\lambda$ حساب می‌شودکه درآن C سرعت نور(برحسب‌متر برثانیه) و λ طول موج نور (برحسب متر) و f تواتر آن (برحسب هرتز) است.

حدود طول موج‌رنگهای طیف نورسفید برحسب آنگستروم

بنفش	۴۱۰۰ Å
آبی	۴۷۰۰
سبز	۵۵۰۰
زرد	۵۸۰۰
نارنجی	۶۱۰۰
قرمز	۶۶۰۰

این‌طول موجها که به‌کمک‌آزمایش دو شکاف یانگ بدست‌آمده‌اند در واقع اندازه‌های متوسطی هستند زیرا هریک ازرنگهای طیف نورسفید شامل تعدادی طول موج متفاوت است که‌با هم‌اختلاف جزئی دارند.

پرسش ۱۴-۸- نوارهای تاریک وروشنی‌که ازآنها نام بردیم ممکن است هم دراثرپدیده تداخل وهم دراثر پدیده تفرق‌ایجاد شوندآیا می‌توانیدفرق بین آنها را بیان‌کنید؟

پرسش ۱۴-۹- اغلب دیده‌ایدکه وقتی‌نور خورشیدبرحبابهای‌آب‌صابون‌یالایه‌های نازک روغن

۱ـ Ångstrom نام یک دانشمند سوئدی است‌که در سال ۱۸۶۸ میلادی نقشه طیف مرئی خورشید را تنظیم‌کرد. آنگستروم دراین نقشه یک ده میلیونیم ($۱۰^{-۷}$) میلیمتر یا یک ده‌هزارم ($۱۰^{-۴}$) میکرون را برای واحد طول موج نور به‌کار برده بود ازآن زمان تاکنون واحدآنگستروم برای اندازه‌گیری طول موج نور به‌کار می‌رود.

شناور برسطح آب می‌تابد رنگی به‌نظر می‌رسد آیا می‌توانید علت را توضیح دهید؟

پرسش ۱۴-۱۰- یکی از ویژگیهای نورکه نیوتن برای وضع تئوری ذره‌ای بودن نور به‌آن استناد می‌کرد انتشار یك دسته پرتو نور به‌خط راست است. در تئوری موجی بودن نور چگونه این ویژگی توجیه می‌شود ؟

منابع نور وطیف‌های آن

در کتاب فیزیك سال دوم دیدیم که چگونه منشور نور سفید حاصل از یك منبع نور را به‌نورهای ساده باطول موجهای متفاوت تجزیه می‌کند.

نورهای ساده‌ای که به‌شکل خطوط یانوارهای باریك یا گسترده به‌ترتیب طول موج در اسپکتروسکوپ یا در دیگر اسبابهای تجزیه نور قابل دیدن یـا قابل عکسبرداری (به‌صورت رنگی یا سیاه وسفید) هستند طیف نامیده می‌شوند .

چگونگی طیف نور حاصل از یك جسم جامد ملتهب (مانند سیم تنگستن درون یك لامپ معمولـی روشن) یا طیف حاصل از یك گاز (مانند ئیدروژن یا نئون) و یا یك بخار داغ (مانند بخارجیوه یا بخار سدیم درون لامپ جیوه یا سدیم) بستگی بـه جنس **ماده پخش کننده نور و دمای آن دارد.**

توجه به این نکته مهم است که طیف حاصل از اجسام جامد ملتهب معمولاً پیوسته وتقریباً یکسان است در صورتی که طیف‌های حاصل ازعناصر گازی‌شکل یا بخارهای داغ معمولاً خط‌خط بوده و باهم اختلاف فاحش دارند و خطوط مربوط به طیف هر عنصر از ویـژگیهای آن عنصر است و بکمك این خطوط آن عنصر شناخته می‌شود.

تمام طیف‌ها، صرفنظر از منابع تولید آنها به چهار دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱ـ طیف نشری اتصالی ۲ـ طیف نشری خطی

۳ـ طیف جذبی اتصالی ۴ـ طیف جذبی خطی

طیف نشری اتصالی

وقتی که به‌یك قطعه فلز مانند آهن یا مس به ملایمت گرما می‌دهیم تا به مرحله گداختگی برسد در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه کلوین فلز بـه رنگ قرمز تیره در می‌آید. به‌تدریج کـه دمای آن بالا می‌رود رنگ قرمز به‌نارنجی سپس به زرد و درآخر به سفید تبدیل می‌شود.

اگر فلز را در ضمن این‌که گرم می‌شود بـه وسیله اسپکتروسکوپ نگاه کنیم نخستین رنگی که در طیف آن ظاهر می‌گردد رنگ قرمز است ، سپس با ظاهر شدن رنگهای دیگر، رفته رفته عرض طیف زیاد می‌شود و با سفید شدن قطعه فلز در اثر گرما ، همه رنگهای مرئی از قرمز تا بنفش در طیف آن پدیدار می‌گردد.

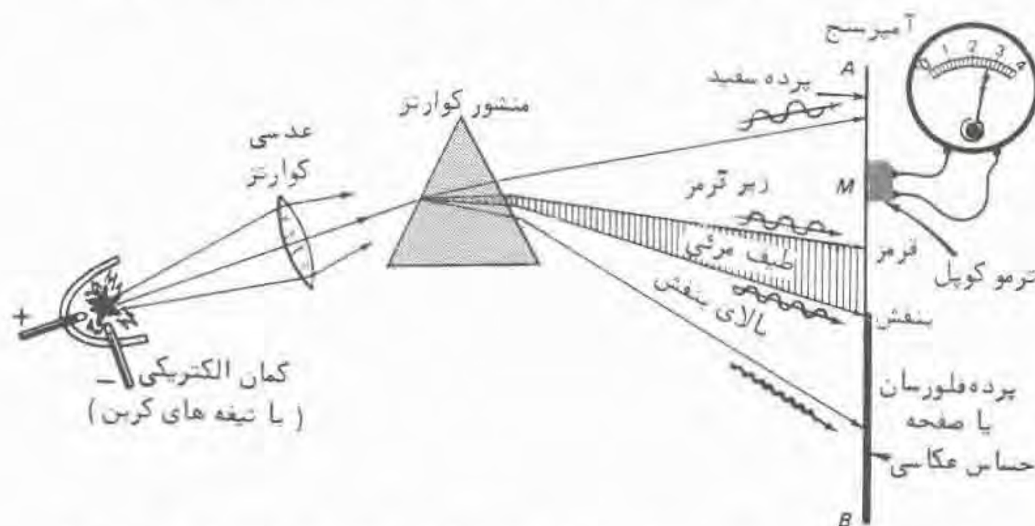
وقتی کـه قطعه فلز به‌رنگ نارنجی درمی‌آید دمای آن درحدود ۱۵۰۰°K وطیف آن شامل رنگهای قرمز و نارنجی و زرد است، موقعی که دما به حدود ۲۰۰۰°K می‌رسد رنگ سبز نیزدرطیف ظاهرمی‌شود یعنی طیف شامل رنگهای قرمز و نارنجی و زرد و سبز است. در حدود ۳۰۰۰°K فلز نورسفید تابش می‌کند و طیف آن کامل می‌شود. اگر دما را بازهم بـالا ببریم رنگهای طیف دیگر تغییر نمی‌کند ولی شدت نور در نواحی مختلف آن زیاد می‌شود.

کار اسپکتروسکوپ دراین آزمایش جدا کردن طول موجهای مختلف از یکدیگر است. دراین عمل بزرگترین طول موج مرئی که درناحیه قرمز است، دریک‌سر طیف و کوچکترین‌طول‌موج‌مرئی که درناحیه بنفش است در سر دیگر طیف و بقیه امواج نور در فاصله میان‌این دوموج درجای‌ویژه‌خود ظاهرمی‌شوند. گرچه رنگها در این طیف مشخص هستند ولی حد فاصلی برای‌آنها نمی‌توان یافت و دراسپکتروسکوپ یك نوار اتصالی از رنگها با طول موجهای مختلف ظاهر می‌گردد که «طیف نشری اتصالی» نامیده می‌شود واین طیف از ویژگیهای جامدات یامایعات حاصل از ذوب آنهاست.

طیف بالای بنفش و زیر قرمز

برای آنکه وجود طیف بالای بنفش و زیر قرمز(که باچشم دیده نمی‌شود) آشکار گردد می‌توان آزمایشی مطابق شکل ۱۴ــ۸ ترتیب داد؛ در این آزمایش نور حاصل از یك لامپ کمان‌الکتریکی (با میله‌های کربن) از یك عدسی و یك منشور، هر دو از جنس کوارتز، عبور داده می‌شود و برروی پرده‌سفیدی که نزدیك منشور قرار می‌گیرد متمرکز می‌گردد. اگر درناحیه‌ای که بعداز رنگ بنفش قرار دارد روی پرده از یك ماده فلورسنت پوشانده شود این ماده در ناحیه نزدیك به انتهای نور بنفش در اثر دریافت پرتوهای بالای بنفش خاصیت فلورسانس پیدا کرده و می‌درخشد. اگر به جای پرده ، یك صفحه حساس عکاسی قرارداده شود پس از ظهور و ثبوت تصویر ، وجود طیف بالای بنفش آشکار می‌گردد.

برای اثبات وجود طیف زیر قرمز می‌توان از یك ترموپیل استفاده کرد. قسمت حساس ترموپیل در ناحیه بنفش قرارداده می‌شود و به‌آرامی به‌ناحیه زیر قرمز منتقل می‌گردد. در این صورت آمپرمتر افزایش تدریجی شدت‌جریان را نشان می‌دهد تاآنکه دریك نقطه در ناحیه M شدت جریان به ماکزیمم می‌رسد ولی ازآن به‌بعد دوباره‌شدت‌کاهش می‌یابد ودرناحیه A (خارج از منطقه طیف) به‌صفر می‌رسد.



شکل۱۴ــ۸ــ این آزمایش نشان می‌دهدکه در دوطرف طیف مرئی‌طیف بالای بنفش و زیر قرمز وجود دارد.

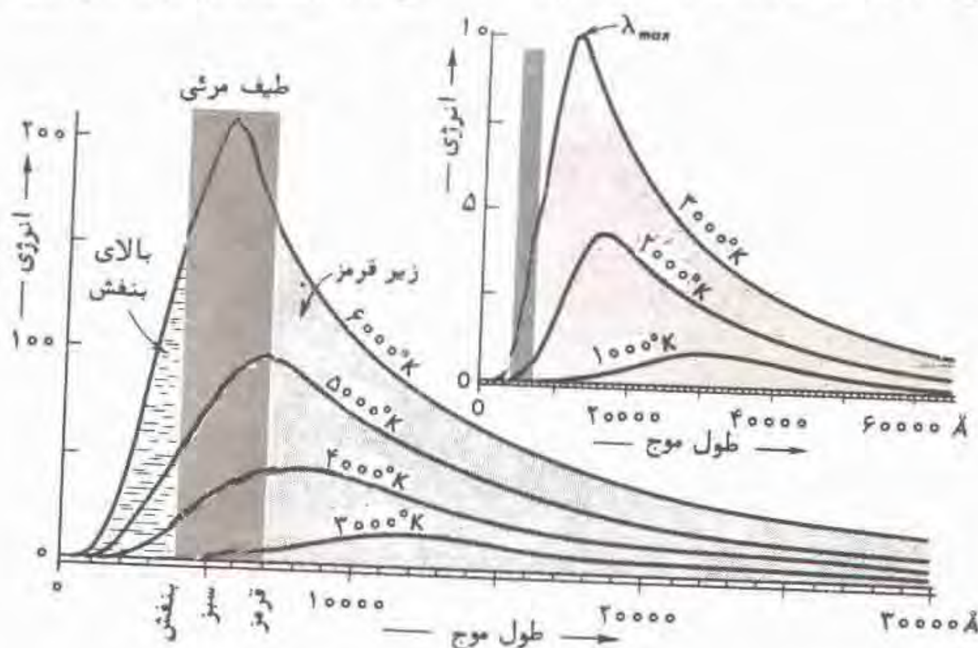
درشکل ۱۴ـ۹، نمودار مربوط به ۳۰۰۰ درجه کلوین توزیع انرژی تابشی را در قسمتهای مختلف طیف یك کمان الکتریکی در روی‌پرده نشان می‌دهد. هریك ازنمودارهای شکل ۱۴ـ۹توزیع مقدارانرژی تابشی در قسمتهای مختلف طیف حاصل از یك جسم جامد را در یك دمای معین نشان می‌دهد.

مطالعه‌این نمودارها نشان‌می‌دهد که دردماهای پائین شدت نور درطیف مرئی ناچیزاست. در دمای $1000°K$ فقط قسمت کمی‌ازناحیه‌قرمز طیف‌مرئی دیده می‌شود ودر $2000°K$ نه‌تنهادرخشندگی ناحیه قرمز افزایش می‌یابد بلکه رنگ‌های نارنجی و زرد وسبزنیز ظاهرمی‌شوند. در $3000°K$ (دمای‌کمان الکتریکی با جریان ضعیف یادمای رشته تنگستن) تمام رنگ‌های طیف ظاهر می‌شود، ولی‌ماکزیمم تابش در ناحیه زیر قرمزاست. در $6000°K$ (دمای سطح خورشید) ماکزیمم انرژی تابشی ازناحیه سبز طیف مرئی تابش می‌شود، و در دو طرف این طیف مرئی مقدارقابل توجهی پرتوهای زیر قرمز و بالای بنفش وجود دارد.

بطوری‌که در شکل دیده می‌شود در دماهای بالا (حدود $6000°K$) طیف‌جسم ناحیه گسترده‌ای را تشکیل می‌دهد ولی آن‌چه بر چشم انسان اثر می‌کند فقط بخش کوچکی ازاین‌ناحیه گسترده‌است.

قانون ویلهلم وین[1] - اثردما درطیف‌اجسام

یکی از واقعیتهای جالب توجه این است که



شکل ۱۴- ۹ - توزیع انرژی منتشرشده ازیك جسم جامد گرم در دماهای مختلف

۱- Wilhelm _ Wien (۱۸۶۴-۱۹۲۸ میلادی)فیزیکدان آلمانی‌که شهرت او بسبب تحقیقاتی است که روی اشعه‌کاتودیك واشعه مثبت و تابش نورانجام داده است. وین درسال ۱۹۱۱ میلادی بسبب کشف همین قانون برنده جایزه نوبل شده است.

وقتی دمای یك جسم داغ به تدریج بالا می‌رود ماکزیمم انرژی که این جسم تابش می‌کند به طرف طول موجهای کوتـاه و کوتاهتر منتقل می‌شود (به شکل ۱۴-۹ توجه شود). با بیان دقیق‌تر اگر دمـای یك جسم دو برابر شود تابش ماکزیمم انرژی تابشی مربوط **به طول موجی خواهد بود که نصف طول موج حالت اول است و اگر دما سه برابر یا چهار برابر شود طول موجی کـه ماکزیمم انرژی وابسته به آن است به** $\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{4}$ مقدار اولیه خود کاهش خواهد یافت.

این قانون که بنام قانون جابجائی وین مشهور است بصورت رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$\lambda_{max} \times T = C \quad (۱۴-۶)$$

C مقدار ثابتی است که اندازه آن برابر است با :

$$C = ۲/۸۹۷۰ \times ۱۰^{-۳} m^{\circ}K$$

T دمای مطلق جسم و λ_{max} طول موج مربوط بـه تابش ماکزیمم انرژی است. با استفاده از فرمول وین می‌توان در هر دما طول موجی را حساب کرد کـه انرژی تابشی مـربوط به آن ماکـزیمم باشد و برعکس با مشخص بودن این طول موج دمای منبع نور را می‌توان حساب کرد.

مثال- دمای یك جسم داغ $۶۰۰۰^{\circ}K$ است. مطلوبست طول موجی که به ازای آن تابش انرژی جسم ماکزیمم است.

داریم :

$$\lambda_{max} = \frac{C}{T} = \frac{۲/۸۹۷ \times ۱۰^{-۳} m^{\circ}K}{۶ \times ۱۰^{۳\circ}K}$$

یا:

$$\lambda_{max} = ۴/۸۳ \times ۱۰^{-۷} m = ۴۸۳۰ \ \mathring{A}$$

نشر وجذب انرژی تابشی (قانون کیرشهف)

میزان گرمائی که یك جسم جذب یا منتشر می‌کند تنها بادمای آن بستگی ندارد، بلکه به طبیعت سطح خارجی آن نیز مربـوط است. اجسامی کـه بسهولت می‌توانند امواجی ازخود تابش کنند، جذب کننده خوبی برای همان طول موجها نیز می‌باشند. به عبارت دیگر هر ماده همان پرتوهـایی را جذب می‌کند که می‌تواند آنهارا تابش کند. ایـن موضوع تحت عنوان «قانون تابش کیرشهف» مشهور است.

جسمی که سطح خارجی آن سیاه است بهمان گونه کـه جذب‌کننده خـوبی است ، تـابش کننده خوبی نیزخواهد بود واگر آن‌را با لایه نازکی‌ازفلز کرم پوشانیم هم نشرکننده ضعیف و هم جذب‌کننده ضعیفی خواهد شد.

بهترین نمونه یك جسم سیاه‌که بتواند تقریباً تمام تابشهای گرمایی (یا نوری) را جـذب کند حفره‌ای است دوده اندودکه درون جعبه‌ای ایجادشده است و داخل این حفره پره‌هایی پوشیده از دوده قراردارد. پرتوهایی که از دهانه این حفره وارد آن می‌شوند تقریباً به‌طورکامل جذب شده و دیگرخارج نمی‌شوند. پارچه ابریشمی سیاه وپاسطحی که‌اندوده به دوده چراغ نفتی باشد تقریباً ۹۷ درصدپرتوهائی راکه به‌آن می‌تابند می‌تواند جذب‌کند. سطوح‌فلزی صیقلی در حدود ۶ درصد انرژی تابشی را جـذب می‌کنند و بقیه را باز می‌تابانند. میزان جذب انرژی تابشی در اغلب مواد دیگر بین این دوحد است.

پرسش ۱۴-۱۱- چرا مردم‌درتابستان ازلباس سفید و در زمستان از لباس تیره استفاده می‌کنند؟

کوانتوم نور ـ فوتون

نخستین کوشش موفقیت‌آمیز برای توضیح شکل

منحنی‌های تابش (شکل ۱۴-۹) توسط ماکس پلانک[1] درسال ۱۹۰۰ میلادی به‌عمل آمد.

کشف امواج الکترومانیتیک حاصل ازنوسان بارهای الکتریکی توسط هرتز (به‌بخش ۱۶ مراجعه شود) پلانک را متقاعد ساخت که تابش نور از یک جسم ملتهب ناشی از ذرات بارالکتریکی‌دار نوسان‌کننده‌ای است که تعدادشان در منبع تولید نور بسیار زیاد است. پلانک فرض کرد که هرذره نوسان‌کننده دارای فرکانس ثابت خاص خود می‌باشد وبا همین فرکانس تابش می‌کند . چون تعداد این ذرات نوسان‌کننده بسیار زیاد است تمام فرکانسهای قابل تصور درآنهاوجوددارد. بنابراین درپرتوهای گسیل‌شده از جسم ملتهب نیز تمام فرکانسها یافت می‌شود و به‌همین‌جهت طیفی که به‌دست می‌آید پیوسته است. وقتی یک ذره نوسان کننده منفرداً انرژی جذب یا تابش می‌کند دامنه ارتعاش آن تغییر می‌نماید ولی فرکانسش ثابت می‌ماند . هر چه فرکانس طبیعی آن بیشتر و دامنه ارتعاش آن درلحظه مورد نظر بزرگتر باشد انرژیش بیشتر است.

در بیان مطالب فوق تا اینجا چیزی بر خلاف اصول نظریه کلاسیک دیده نمی‌شود ولی تئوری کلاسیک تلویحاً دو فرضیه زیر را نیز شامل می‌شود:

نخست این‌که انرژی E یک‌نوسان‌کننده منفرد می‌تواند همه مقادیر از صفر به‌بالا را داشته باشد و با تغییر دامنه نوسانش می‌تواند هرمقدار انرژی را به‌طور پیوسته تابش یاجذب نماید، مانند یک‌آونگ معمولی که وقتی درهوا نوسان می‌کند دراثراصطکاک با هوا دامنه نوسانش به‌تدریج به‌طور پیوسته‌کاهش می‌یابد تا به صفر برسد (یعنی بایستد).

دوم این‌که هرذره باردارهنگامی تابش‌می‌کند که شتاب بگیرد. پس نوسان‌کننده درتمام مدتی که نوسان می‌کندچون حرکتش شتابدار است بایدتابش نماید. ولی این دو پیشگویی کلاسیک با نتایجی که به‌طور تجربی ازمطالعه تابش اجسام ملتهب به‌دست آمده بود تطبیق نمی‌کرد. بنابراین در راه تطبیق آن نتایج باتئوری، پلانک‌نظریه‌کوانتیک خود رابراساس دو فرض زیرکه امروزه درفیزیک‌اهمیت خاص دارند بنا نهاد:

۱- هر نوسان کننده فقط می‌تواند انرژیهای مشخصی را داشته باشد. این انرژیهای مجازمضارب درستی از یک مقدار hf هستند.

f فرکانس نوسان‌کننده و h یک ثابت‌عمومی است که امروزه به‌نام «ثابت پلانک» شناخته شده‌و مقدارش برابر است‌با:

$$h = ۰/۶۶۲۶۲۰ \times ۱۰^{-۳۴} js$$ (ژول.ثانیه)

بنابراین انرژی نوسان‌کننده در هر لحظه ممکن است

۰ ، ۱hf ، ۲hf ، ۳hf

یا به‌طورکلی nhf باشد. n یک عدد درست‌است‌که «عدد کوانتیک» نامیده‌می‌شود. بنابراین‌انرژی تابشی هیچگاه نمی‌تواند کسری از hf مثلاً ۱/۸۵hf باشد.

به‌طور خلاصه:

$$E = nhf$$

۱- ماکس پلانک (۱۹۴۷-۱۸۵۸ میلادی) یکی از فیزیکدانان آلمانی است.او چند جلدکتاب در مورد فیزیک تئوری تألیف‌کرد وبنام پدر تئوری‌کوانتم مشهور شد وبدلیل ارائه تئوری تابش اجسام سیاه در سال ۱۹۱۸ میلادی موفق بهاخذ جایزهٔ نوبل گردید.

hf که مربوط به فرکانس f است «کوانتوم انرژی» نامیده می‌شود. به‌عبارت دیگر انرژی کلی که از یك نوسان کننده تابش می‌شود یك «کمیت کوانتایی» متشکل از پاره‌هـای انرژی به اندازه hf و به نام «کوانتوم انرژی» است که «فوتون» نیز نامیده‌می‌شود.

نتیجه آن که، تغییر انرژی تابشی تدریجی و پیوسته نیست بلکه ناپیوسته وکوانتایی است مثلاً از ۳hf به ۲hf یا از ۵hf به ۶hf و ....

۲ــ یك نوسان‌کننده فقط هنگامی تابش‌می‌کند کـه انرژی آن از یك مقدار مجاز بـه مقدار مجاز کوچکتر بعدی تغییر یابد و انرژی ΔE که نوسان‌ـکننده با کاهش ناگهانی دامنه نوسان خود از دست می‌دهد به‌صورت یك‌تك موج(پالس) الکترومانیتیك با انرژی hf تابش می‌شود.

به همین ترتیب نوسان‌کننده می‌تواند کوانتوم انرژی hf را از پرتوهایی که بر آن می‌تابد جذب کند و بلافاصله انرژیش به مقدار مجاز بالاتر بعدی برسد.

درحقیقت،کاربرد اندیشه‌کوانتایی بودن انرژی اکنون نه‌تنها درتمام قلمرو ذرات ورای میکروسکپی به‌رسمیت شناخته شده بلکه‌درباره هردستگاه فیزیکی که درآن انرژی وابسته به‌نوسان، ارتعاش یا دوران باشد نیز مورد نظر قرار گرفته است.

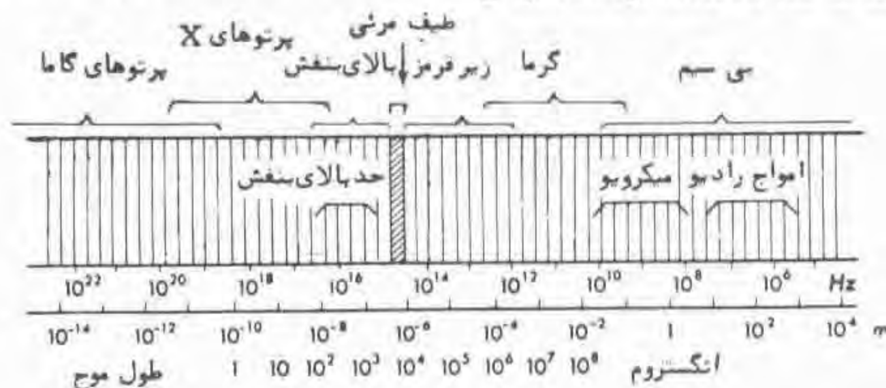
پرسش ۱۴-۱۲- پس چرا اثر کوانتایی بودن انرژی در پدیده‌های با مقیاس بزرگ، مثلاً نوسان آونگ ، مشاهده نمی‌شود؟

طیف کامل امواج الکترومانیتیك

امواج نور به‌صورت بالای بنفش ومرئی و زیر قرمز فقط قسمت کـوچکی از طیف تـابشی امـواج الکترومانیتیك را تشکیل می‌دهند. در شکل ۱۴ــ۱۰ طرح ساده‌ای ازطیف کامل امواج‌الکترومانیتیك نشان داده شده است.

بعداز امواج زیر قرمز بطرف طول موجهای بلند به امواج گرمائی وامواج بی‌سیم میرسیم .

بعداز امواج فوق بنفش بطرف طول‌موجهای کوتاه، به پرتوهای x و پرتوهای γ میرسیم . هـر نوع‌موج الکترومانیتیك چه بـا طول مـوج خیلی دراز (مانندامواج رادیو به‌طول موج چندکیلومتر) چه با طول موج خیلی‌کوتاه (مانند پرتوهای γ با طول مـوج یك میلیون میلیونیم سانتیمتر) همه در محیط خلاً با سرعت تقریباً $۳ \times ۱۰^{۸} m/s$ منتشر



شکل ۱۴-۱۰- طیف کامل‌وطول‌موج وفرکانس امواج الکترومانیتیك

میشوند. با آنکه سرعت همه آنها درخلاء یکی است ولی خواص آنها متفاوت است. بعنوان مثال چشم انسان نمی‌تواند همه امواج الکترومانیتیک رابیبند، بلکه ازنوار بسیار گسترده شکل ۱۴-۱۰ فقط قسمت کوچکی ازآن با چشم دیده می‌شود. مطلب دیگری که درباره امواج الکترومانیتیک بایدبدانیم این است که هوا برای تمام امواج الکترومانیتیک غیرازامواج بالای بنفش سخت (یعنی با طول موج کوتاه) شفاف است.

امواج بالای بنفش سخت درهوا جذب میشوند.

مه برای تمام امواج الکترومانیتیک به جز امواج بی‌سیم جسم کدراست .

طیف نشری خطی

وقتی که شکاف یك اسپکتروسکپ با نور حاصل از یك لامپ جیوه یا یك لامپ سدیم یا یك لامپ نئون روشن شود در دوربین دستگاه بجای یك طیف پیوسته چندخط روشن دیده می‌شود. (شکل‌های ۱۴-۱۱ و ۱۴-۱۲).

هرخط این طیف معرف یك ارتعاش سینوسی با طول موج مشخص می‌باشد که بوسیله اتم بخار یا گاز تابش می‌شود مطالعه این خطوط وطول موج آن‌ها نشان داده است که این خطوط بدسته‌هائی قابل تقسیم می‌باشند که شدت وتواتر آنهاتابع نظم خاصی می‌باشد وهر یك ازاین دسته‌هارا یك سری طیف می‌نامند.



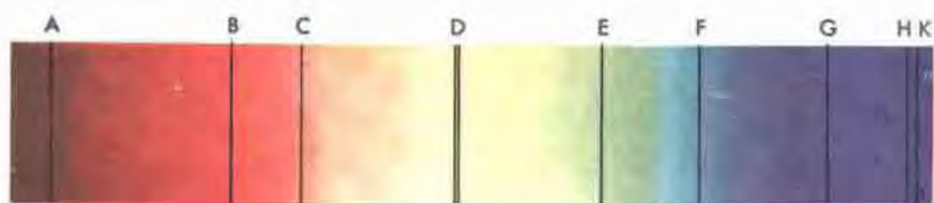
شکل ۱۴-۱۱- تصویر طیف نشری خطی چند عنصر درحالت گازی

برای مشاهده خطوط طیف روی یک پرده بزرگ می‌توان آزمایشی مطابق شکل (۱۴-۱۳) انجام داد.

باید دانست که اجسام جامد ملتهب همیشه طیف نشری اتصالی تولید می‌کنند در صورتیکه بخارهای آنها در دمای زیاد و فشار کم وهمچنین گازها تولید طیف خطی می‌کنند (شکل ۱۴-۱۱).

طیف جذبی پیوسته

اگر نور مولد طیف نشری اتصالی را از یک جسم جامد یا مایع شفاف عبور دهیم و آن را بر شکاف اسپکتروسکپ بتابانیم طیف حاصل یک طیف پیوسته جذبی خواهد بود. آسانترین راه برای تشکیل دادن این قبیل طیف‌ها عبور نور سفید از شیشه‌های رنگی است. بطورمثال



طیف خورشید

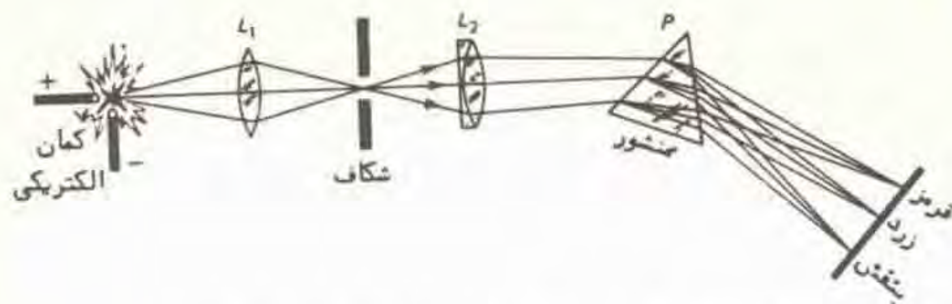

طیف بخار سدیم


طیف بخار جیوه


طیف بخار لیتیوم


طیف ئیدروژن

شکل ۱۴-۱۳



شکل ۱۴-۱۳- ترتیب یك آزمایش برای نشان دادن طیف نشری خطی

اگر مقابل نورسفید یك صافی قرمز قرار دهیم تمام رنگ‌ها بـه جز نور قرمز بوسیله شیشه جذب میشود و درنتیجه روی صفحه طیف فقط طیف نـاحیه قرمز تشکیل می‌شود.

طیف جذبی خطی

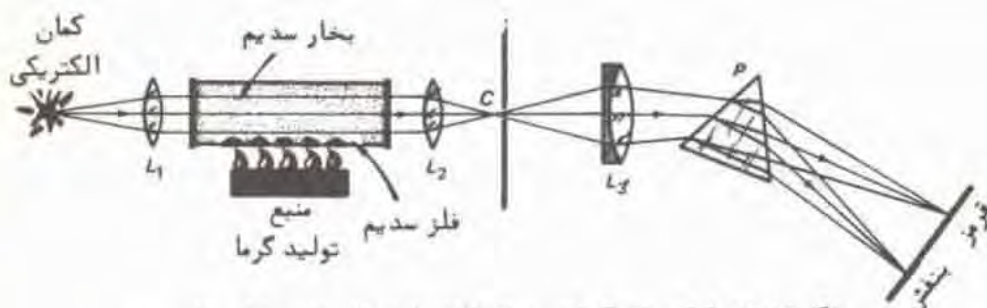
برای تشکیل طیف جذبی خطی نورسفید کاملی را از داخـل یك گـاز عبور داده سپس طیف آن را تشکیل می‌دهند مطابق شکل (۱۴-۱۴) نورسفید حاصل ازیك کمان الکتریکی باتیغه‌های کربن پس ازعبور از عدسی L_1 واردلوله شیشه‌ای محتوی بخارسدیم می گردد سپس بوسیله عدسی L_2 روی شکاف C متمرکز می‌شود ونور خـارج شده ازشکاف پس ازعبور از عدسی L_3 بهمنشورمی‌تابد، وروی صفحه پشت عدسی طیف تشکیل می‌دهد.

علت انتخاب بخار سدیم آن است که تهیه و استفاده ازآن آسان می‌باشد.

برای تولید بخار سدیم کافی است مقدارکمی فلزسدیم رادرون لوله شیشه‌ای که تا انـدازه‌ای از هوا تخلیه شده است قـرار دهیم و با استفاده از یك چراغ گاز آن راگرم کنیم. به‌محض آنکه داخل لوله از بخار سدیم پرشود روی طیف در ناحیه زرد یك خط تاریك ظاهر می‌شود.

اگر از طیف جذبی خطی فـوق عکسبرداری کنیم و طول فیلم یـا شیشه عکاسی تـا ناحیه بالای بنفش ادامه پیداکند خطوط جذبی بسیاری در قسمت نامرئی نیز ظاهر می‌شود (شکل ۱۴-۱۵).

برای تشکیل سری‌های منظم ازخطوط جذبی



شکل ۱۴-۱۴- ترتیب یك آزمایش برای نشان دادن طیف جذبی خطی بخار سدیم.



شکل ۱۴-۱۵- طیف جذبی بخار سدیم، سریهای اصلی سدیم.

مانند آنچه که دربالا به‌آن اشاره شد می‌توان غیر از سدیم‌از فلزات قلیائی دیگر مانند لیتیم، پتاسیم، روبیدیم و منیزیم استفاده کرد. تمام عناصر در حالت گازی نیز چند خط جذبی معمولاً در ناحیه بالای بنفش دارند.

طیف خورشید

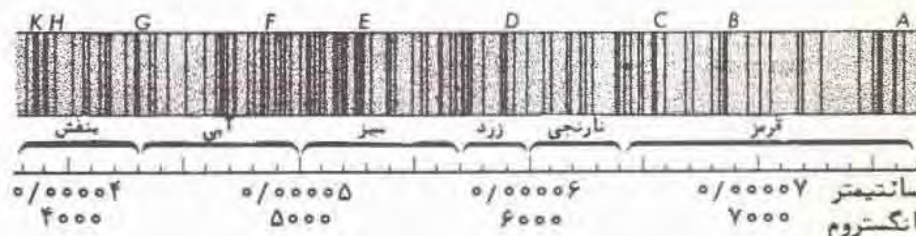
طیف خورشید بصورت یک‌طیف رنگی‌اتصالی است که بوسیله هزاران خط تاریک قطع شده است.

این طیف اولین‌بار بوسیله ولاستون[1] مشاهده شد و درسال ۱۸۱۷ میلادی فرانهوفر[2] آن راموردمطالعه دقیق قرارداد و تعداد هشت خط ازاین‌مجموعه را با حروف A،B،C،D،E،F،G،H نشان داد. مشخص‌ترین این خطوط که، خطوط فرانهوفر نامیده می‌شوند درشکل (۱۴-۱۶) دیده می‌شود.

درسال ۱۸۸۲ میلادی‌رولند[3] دانشمندامریکائی عکسی ازطیف‌خورشید تهیه کرد که‌طول آن۱۲متر بود ودر شکل (۱۴-۱۷) قسمت‌کوچکی از آن مشاهده می‌شود.

باتوجه به‌آنکه دمای سطح خورشید حدود $6000^{\circ}k$ می‌باشد طیف آن باید یک طیف پیوسته باشد درصورتیکه عبور نور خورشید از اتمسفر آن باعث‌جذب‌بعضی‌ازطول‌موجهای‌آن‌می‌شود وخطوط سیاه را درطیف نور خورشید باعث می‌گردد.

گازهائی که در مسیر نور خورشید هستند (اتمسفر زمین وخورشید) طول موجهائی را جذب

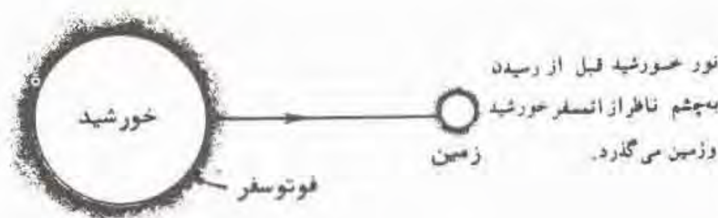


شکل ۱۴-۱۶- طیف خورشید که در آن خطوط واضحتر بوسیله حروف الفبا مشخص شده است.

۱- Wollaston ۲- Fraunhofer ۳- (H-A-Rowland)



شکل ۱۴-۱۷- دو تصویر کوچک از طیف خورشیدی که بوسیله رولند تهیه شده است.





شکل ۱۴-۱۸

می‌کنند که طبق قانون کیرشهف اگر گرم شوند می‌توانند تابش نمایند، از اینرو خطوط سیاه طیف خورشید معرف عناصر شیمیائی است که در مسیر نور قرار گرفته است (شکل ۱۴-۱۸).

بطوری که درشکل دیده می‌شود نوارهای بالا وپائین (الف و پ) که معرف طیف‌های خطی قوس آهن و کلسیم می‌باشد درست دربرابر بعضی از خطوط سیاه طیف خورشید قرار دارد و از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که درمسیر نور خورشید آهن و کلسیم موجود است. بااین روش مقایسه‌ای می‌توان از وجود تعداد زیادی ازعناصر موجود درخورشید آگاه شد.

به این پرسشها پاسخ دهید

۱) سه آزمایش بیان کنید که نشان دهند نور به خط راست منتشر می‌شود.

۲) آیا به منظور داشتن یك پرتو نور می‌توانیم نور را از سوراخ بسیار ریـزی عبور دهیم؟ توضیح دهید .

۳) آیا یك پرتو نور را آن‌طور که موردنظر است عملا می‌توان ایجادکرد؟ توضیح دهید .

۴) نیوتن چگونه نشان دادکه نورسفید یك نورمرکب است ؟

۵) با سابقه آشنائی که درباره اتر دارید بگوئید چرا فرض شدکه برای انتشار نور سیالی به نام اترلازم است ؟

۶) با توجه به‌این‌که امواج نورعرضی‌هستند این اتر فرضی چه خاصیتی می‌بایست‌داشته باشد تا محیط مکانیکی مناسبی برای انتشارموجهای نور باشد ؟

۷) آیا پدیده تداخل درامواج صوتی‌نیزاتفاق می‌افتد. یادآور می‌شویم که امواج صوتی درهوا به‌طور طولی وامواج نوری‌به‌طورعرضی منتشر می‌شوند.

۸) اگرآزمایش یانگ عیناً درآب انجام‌گیرد چه تغییری دروضعیت نوارها نسبت به هوا حاصل می‌شود؟ توضیح دهید .

۹) اگرازمیان شکاف باریك انگشتان دست خودبه آسمان روشن یا به یك منبع نورنگاه کنیم نوارهای تاریك وروشنی را مشاهده می‌کنیم، این نوارها مربوط به پدیده تـداخل هستند یا پدیده تفرق؟ توضیح دهید .

۱۰) درآزمایش یانگ‌کدام یك از پدیده‌های زیر اتفاق می‌افتد ؟

تداخل، تفرق، هم تداخل وهم تفرق

۱۱) درچه صورت دوچشمه نور را همسان (کوهرنت) گویند ؟

۱۲) چرا شرط لازم برای ایجاد پدیده تداخل داشتن دوچشمه همسان است ؟

۱۳) چگونه می‌توان دو یا چند چشمه نور همسان به دست آورد ؟

۱۴) آیا می‌توان دوچشمه همسان نوررا دوتصویر مجازی یك منبع نور (مثلا یك‌شکاف که ازآن پرتوهای نورگسیل می‌شود) در دوآینه تخت متقاطع دانست؟ برای این‌کـه این دو تصویرمجازی بهم خیلی نزدیك باشند (به فاصله چند میلیمتر) دوآینه نسبت‌بـه‌هم چه وضعی باید داشته باشند؟ شکاف منبع نوررا موازی با فصل مشترك‌دوآینه بگیرید ودوتصویرمجازی آن راکه خیلی به هم نزدیك باشند دردوآینه با رسم دقیق مسیرپرتوها پیداکنید .

۱۵) درنظربگیریدکه درآزمایش یانگ دوشکاف بوسیله نورتکرنگ قرمز روشن شده است ونوارهای تداخلی برروی پرده‌ای موازی با سطح‌شکافها تشکیل گردیده است برای‌این‌که فاصله دونوار روشن متوالی را زیادکنیم می‌توانیم :

۱ـ به جای نورتکرنگ قرمز، نورتکرنگ بنفش به‌کار بریم .

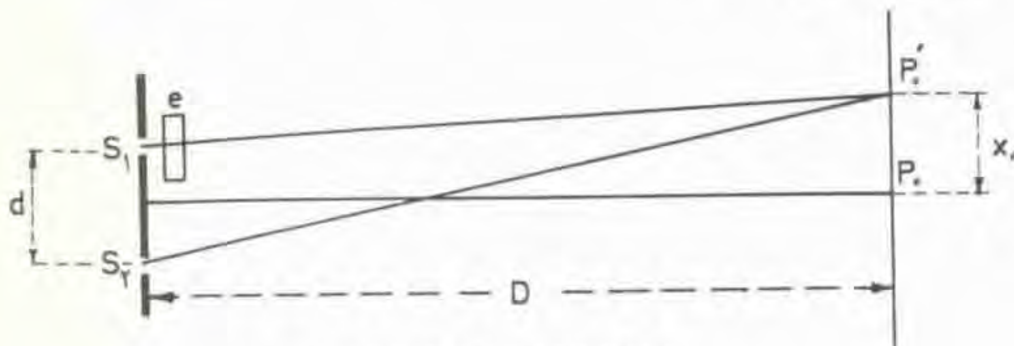
۲ـ فاصله پرده را ازشکافها زیادتر کنیم .

۳ـ دوشکاف را به هم نزدیکتر کنیم .

۴ـ عرض شکافها راکمتر کنیم. (درجواب درست بحث کنید)

۱۶)ـ اگردر آزمایش یانگ شکافها با نورسفید روشن شوند ، نوارهای تداخلی چگونه خواهند بود ؟

۱۷)ـ درآزمایش یانگ، اگر جلو یکی‌ازشکافها تیغه متوازی‌السطوح بسیار نازك شفافی قرارداده شود مجموعه نوارهای تداخلی که روی یك پرده تشکیل شده‌اند بـا هم بـه موازات یکدیگر بـه سمتی کـه تیغه قرار داده شده است انتقال می‌یابند مثلا نوار مرکزی P_o به P'_o منتقل می‌شود شکل (۱۴ـ۱۹).



شکل (۱۴-۱۹) تغییر مکان نوارهای تداخلی

اگر ضخامت تیغه e وضریب شکست آن n باشد وهنگامی که‌شکافها با نورتکرنگی‌روشن می‌شوند نوار مرکزی به اندازه x_o تغییرمکان بدهد با محاسبه نشان دهید که :

$$x_o = \frac{D}{d}(n - ۱)e \qquad (۷-۱۴)$$

آیا می‌توان با این روش ضریب شکست یك ماده شفاف را اندازه گرفت ؟ توضیح دهید .

راهنماییـ اگر V سرعت نور درتیغهٔ متوازی‌السطوح نامبرده باشد زمان‌عبور نور در تیغه برابر است با: $t = \frac{e}{v}$

در همین‌مدت مسافتی‌که نور با سرعت c درهوا می‌پیماید برابر است با :

$$e' = ct = \frac{c}{V}e = ne$$

(زیرا نسبت $\frac{c}{v}$ برابر ضریب شکست n است)، بنابراین‌مثل‌این است‌که تیغه متوازی‌السطوح مسیر $S_۱P'_o$ را به اندازه $e' - e = en - e = e(n - ۱) = k\lambda$ افزایش داده است .

۱۸) دربازتابش امواج از روی یك مانع (بخش۱۲) دیدیم که وقتی موج به مانع سختی برخورد می‌کند و برمی‌گردد جهت آن وارونه می‌شود. این بدان معنی است که بین موج تابش وموج بازتابش اختلاف فاز π به‌وجودمی‌آید. آیا این کیفیت درمورد امواج‌نورنیزصادق‌است؟

یعنی اگرامواج نور ازمحیطی که ضریب شکست‌آن‌کمتراست بـه سطح محیط دیگری کـه ضریب شکست بیشتری دارد بتابـد وازروی آن بـازتابش حاصل‌کند آیا بین موجهای تابش و بازتابش‌اختلاف فاز π به وجودمی‌آید؟ اگرمحیط دوم ضریب شکست‌کمتری نسبت به‌محیطاول داشته باشد چطور؟ آیا می‌توانیدکیفیت تداخل راکه براثرتابش نوربرلایه نازك روغن یا حباب آب صابون صورت می‌گیرد براین اساس توجیه‌کنید ؟

۱۹) با توجه به این‌که طیف حاصل ازاتمهای منفردگازازخطوط باریکی تشکیل‌می‌شود به‌نظر شما طیف حاصل‌ازملکولهای‌گاز مرکب ازدویا چنداتم چگونه است ؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱) طول موج پرتو نور تکرنگی درخلاء $۵/۰۰۰ \times ۱۰^{۳}$ آنگستروم است. مطلوب است:

الف‌ـ پریه وفرکانس این پرتو

بـ سرعت وطول موج آن درشیشه‌ای به ضریب شکست $n = ۱/۵۰$ سرعت نور را در خلاء $۳/۰۰ \times ۱۰^{۵}$ کیلومتر برثانیه بگیرید .

جواب: $T \approx ۱/۶۷ \times ۱۰^{-۱۵}s$ و $f = ۶ \times ۱۰^{۱۴}Hz$، $V = ۲ \times ۱۰^{۵}\frac{km}{s}$، $\lambda = ۳۳۳۰\,\mathring{A}$

۲) درآزمایشی دوشکاف باریك و موازی توسط نور قرمز به طول موج $\lambda = ۶۴۳۸\,\mathring{A}$ روشن شده‌است ونوارها درفاصله ۸۰/۰ سانتیمتری صفحه شکافها توسط یك میکروسکپ مدرج اندازه‌گیری شده است. اگر در ایـن آزمایش فاصله نوار روشن پانزدهم از نوار وسطی ۸/۶۲ میلیمتر باشد فاصله دوشکاف را تا سه‌رقم معنی‌دار مشخص‌کنید. جواب: ۰/۸۹۶mm

۳) با یك چشمهٔ نورتکرنگ S دو شکاف موازی وباریك S_1 و S_2 راکه فاصله آنها از یکدیگر ۰/۳ میلیمتر است روشن کرده‌ایم ونوارهای تداخلی را روی صفحه‌ای به فاصله ۳/۰۰ متر ازصفحه شکافها تشکیل داده‌ایـم اگر ازوسط نوار روشن اول تا وسط نوار روشن مرکزی ۶۰/۰ میلیمتر فاصله باشد .

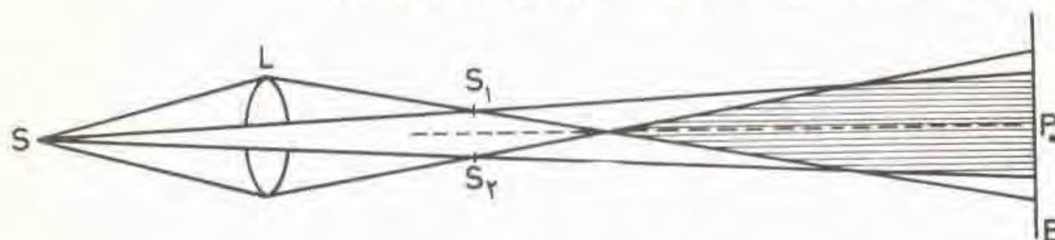
الف‌ـ طول موج نوربه‌کار رفته چه اندازه است ؟

بـ اگرعرض نوارهای تاریك وروشن یکی باشد اندازه عرض هرنوار چیست ؟

جواب: الف) $۶۰۰۰\,\mathring{A}$ ب) ۰/۳۰mm

۴) یك عدسی نازك همگرا به فاصله کانونی ۵۰سانتیمتر ازوسط به دونیم عدسی‌مساوی بریده شده است منبع نور تکرنگ S به صورت یك شکاف خیلی باریك، به‌طور موازی با خط

جدا گر دوعدسی درصفحه‌ای ازمحور اصلی عدسی می‌گذرد به فاصله یک‌متر ازدونیم عدسی‌قرار دارد ومحوراصلی عدسی ازوسط این شکاف می‌گذرد (شکل ۱۴-۲۰).



شکل (۱۴-۲۰) تشکیل پدیده تداخل با دونیم عدسی

الف) چه اندازه باید دونیم عدسی را در دوطرف محوراصلی به قرینه هم از یکدیگر دور کرد تا دوتصویر S_1 و S_2 به فاصله ۴میلیمتر ازهم به‌دست‌آید .

ب) در حالتی‌که دوتصویر S_1 و S_2 به دست آمـده است پرده E را عمود برمحوراصلی به فاصله ۳متر ازاین دوتصویر قرار می‌دهند. عرض ناحیه‌ای‌که نوارهای تداخلی درآن‌تشکیل می‌شوند چه اندازه است ؟

پ) روی این پرده فاصله وسط یکی‌ازنوارهای روشن را از بیستمین نوار روشن در طرف راست یا چپ این نوار ($k = ۲۰$) اندازه می‌گیرند ، این فاصله برابر ۸/۱۹ میلیمتر می‌شود. طول موج نور به‌کار رفته چه اندازه است ؟

جواب : الف) ۲mm   ب) ۱۰mm   پ) ۵۴۶۰Å

۵) دمای یك تابنده‌کامل(جسم‌سیاه) ۳۰۰۰°k است. با چه طول موجی تابش انرژی از آن ماکزیمم است؟ این تابش درچه ناحیه‌ای ازطیف واقع است ؟

۶) دریك جسم سیاه ماکزیمم تابش انرژی مربوط به طول موج ۳۶۵۰Å است. دمای جسم را برحسب درجه سلسیوس ودرجه‌کلوین حساب‌کنید .

۷) انرژی وابسته به فوتونهای زیررا حساب‌کنید .

الف- فوتون تابش‌شده ازیك جسم‌سیاه دارای طول‌موج ۵۴۰۰ آنگستروم.

ب- فوتون مربوط به پرتو گاما با طول موج ۰/۰۱ آنگستروم .

پ- فوتون مربوط به یك پرتو گرمایی با طول موج ۱ میکرون .

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۴

۱۴-۱)- زیرا زمان انتقال علامت نوری ازیك ناظر به ناظر دیگرآن قـدرکوتاه بودکه برآوردآن با روشی‌که به‌کار رفته بود غیرممکن بود .

۱۴-۲)- به‌علت سرعت خیلی زیاد نور و عدم امکان اندازه‌گیری زمانهای کوتاه‌که نور برای پیمودن فواصل محدوددر روی زمین لازم دارد .

۱۴-۳)- تئوری ذره‌ای نیوتن پیش‌گویی می‌کندکه سرعت ذرات نور دریك محیط شفاف مانندآب به سبب نیروی جاذبه‌ای‌که ازطرف ملکولهای محیط برآنها وارد می‌شود همواره افزایش می‌یابد ولی تئوری موجی نورطبق رابطه (۱۴-۲) پیش‌گویی می‌کند که این سرعت کاهش می‌یابد. آزمایش نیزکاهش سرعت را نشان می‌دهد یعنی نظریه موجی راتأیید می‌کند.

۱۴-۴)- سرعت و طول موج نور هردوکم می‌شوند ولی تواتر نور تغییرنمی‌کند .

۱۴-۵)- نور سفید آمیزه‌ای از رنگها است. سرعت هریك ازاین رنگها درشیشه متفاوت است به عبارت دیگر ضریب شکست شیشه برای این رنگها یکی نیست. بنابراین وقتی‌که یك دسته پرتو نورسفیدبرمنشور می‌تابد هررنگ با زاویه شکست ویژه خودکه برای رنگهای دیگر متفاوت است شکست می‌یابد درنتیجه رنگهای تشکیل دهنده نورسفید ازهم جدا می‌شوند و به شکل طیف رنگین ظاهر می‌گردند . همین عمل در دانه‌های باران نیز صورت می‌گیرد و رنگین‌کمان را درآسمان به وجود می‌آورد .

۱۴-۶)- به شکل نیم استوانه ، مقطع این نیم‌استوانه‌ها نیم‌دایره‌های هم مرکز مرکزی هستندکه درشکل (۱۴-۴) دیده می‌شود .

۱۴-۷)- زیرا هرنقطه ازلبه هریك ازاجسام، خود منبع ایجاد موج‌نورجداگانه می‌شود.

۱۴-۸)- به‌طورکلی، پدیده تداخل دراثر تلاقی تعداد محدودی امواج نورحاصل از چشمه‌های همسان (دوموج‌درآزمایش دوشکاف یانگ) به‌وجودمی‌آید، درصورتی‌که پدیده‌تفرق، طبق اصل هویگنس ازتلاقی امواج نورحاصل ازتعداد نامحدودی چشمه نقطه‌ای واقع برجبهه موج، درلحظه‌ای‌که این جبهه ازسطح شکاف می‌گذرد، تولید می‌گردد .

درشکل (۱۴-۲۱-الف) پدیده تفرق حاصل‌ازگسیل نورازیك شکاف باریك نشان داده



شکل ۱۴-۲۱- مقایسه نوارهای تداخلی وتفرقی نور

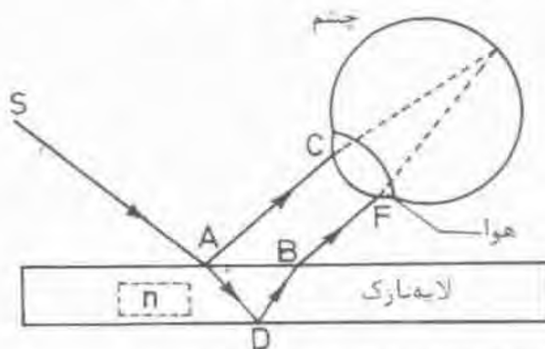
(الف)



(ب)

شده است ولی درشکل (۱۴–۲۱–ب) نوارهای تداخلی حاصل‌ازگسیل نور ازدوشکاف باریک و موازی دیده می‌شود. این نوارها درزمینه روشن نوارهای تفرقی شکل الف تشکیل یافته‌اند به‌طوری‌که اگر یکی ازشکافها را بپوشانیم نوارهای تداخلی ازبین می‌روند وزمینه نوارهای تفرقی باقی می‌ماند .

۱۴–۹)– درنظر بگیریم‌که پرتونور SA درنقطه A به سطح‌یك لایه نازك روغن‌که روی آب ریخته شده است می‌تابد(شکل ۱۴–۲۲) قسمتی‌ازاین پرتودر راستای AC بازتابش حاصل می‌کند وقسمت دیگر آن درامتداد AD شکست می‌یابدودرنقطه D به‌سطح پائینی لایه می‌تابد. دراین‌نقطه نیز یك قسمت ازاین پرتو شکست می‌یابد وازلایه خارج می‌شود (این قسمت‌درشکل نشان داده نشده است) وقسمت دیگردر راستای DB بازمی‌تابد وبه صورت پرتو BF موازی با BC ازسطح بالایی لایه خارج می‌گردد . پرتوهای AC و BF ، هر دو دریك نقطه روی پرده‌شبکیه چشم جمع می‌شوند. (در شکل ۱۴–۲۲، ضخامت لایه روغن و فاصله دو پرتو بزرگتر ، از آنچه‌که هست نشان داده شده‌است) .



شکل۱۴–۲۲– تداخل میان پرتوهایی‌که ازسطحهای بالایی و پائینی یك‌لایه نازك باز می‌تابند

اگر نور تابنده یك دسته پرتو تکرنگ باشد بدیهی است تعداد زیادی پرتو وارد چشم می‌شود و چون این پرتوها مسیرهای متفاوتی را می‌پیمایند اختلاف راه و ارتباط بین فازهای آنها طوری است که پدیده تداخل حاصل‌می‌شود واگردو سطح لایه کاملا موازی باشند نوارهای تداخلی دایره‌ای شکل خواهند بود.هرگاه برلایه نورسفید بتابد سطح لایه رنگین به‌نظر میرسد.ورنگ آن درهر نقطه حاصل ترکیب‌رنگهائی خواهد بودکه درآن نقطه می‌توانند بازتابش حاصل‌کنند. رنگهائی که در پرتوهای بازتابیده دیـده نمی‌شوند در پرتوهایی وجود دارندکه درلایه شکست یافته واز سطح پائینی آن خارج می‌شوند .

۱۴–۱۰)– تئوری موجی بودن نور به این پرسش وقتی توانست پاسخ دهدکه طول‌موج نور توسط یانگ حساب شد ومعلوم گردید که بسیارکـوچك است، به‌طوری‌که طول موج نور قرمز هم‌که بـزرگترین مقدار را درطیف مرئی دارد از هزارم میلیمتر کـوچکتر است . بنابراین یك دسته پرتو نور وقتی‌که ازیك سوراخ به قطر چند میلیمتر یا بزرگتر می‌گذرد به‌نظر می‌رسد که به خط راست منتشر می‌شود .

۱۴–۱۱)– زیرا لباس سفید جذب کننده ضعیف ولباس سیاه جذب کننده قوی می‌باشد.

۱۴–۱۲)– زیراکوانتوم hf بسیار بسیار کوچك‌است. مثلاً در نظر بگیریم کـه فرکانس

نوسان آونگ ۱ هرتز است. انرژی آونگ به سبب اصطکاک با ملکولهای هوا کاهش می‌یابد ولی تنزل انرژی آن به اندازه یك کوانتوم hf برابر $۶/۶۲۶۲ \times ۱۰^{-۳۴}$ ژول است. تغییر ناگهانی دامنه نوسان آونگ به ازاء این کوانتوم انرژی آن‌قدر کوچك است که امکان مشاهده ندارد. از طرف دیگر کوچکترین تغییر قابل مشاهده در دامنه نوسان، مربوط به تعداد کوانتوم آن‌قدر بزرگ است که اثر ناپیوسته بودن انرژی ظاهر نمی‌شود.

۱۵

قطبی شدن یا پلاریزاسیون[1] نور

آزمایشهایی که در مـورد تفرق وتداخل نور دربخش ۱۴ بیان شد دلایلی بر درستی فرضیه موجی بودن نوراست. با آن‌که به‌وسیله این‌گونه آزمایشها می‌توان طول موج نوررا بادقت اندازه‌گرفت ولی نمی‌توان به‌کمك آنها نوع امواج نور، یعنی طولی یاعرضی‌بودن آنها را مشخص کرد. علت عدم تشخیص این‌است که همهٔ انواع موجها در شرایط مناسب پدیده‌های تفرق وتداخل را باعث می‌شوند. تعیین نوع امواج نور به‌وسیله پدیده دیگری به‌نام «قطبی‌شدن یا پلاریزاسیون» صورت می‌گیرد که ازقرن هفدهم میلادی شناختن آن‌آغازشده‌است.

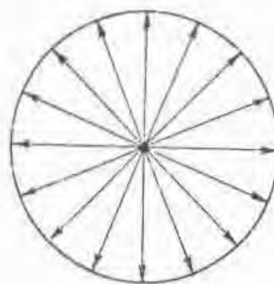
درسال ۱۶۶۹ میلادی کشف شدکه بلورهای اسپات دیسلانـد (کلسیت) خاصیت شکست مضاعف دارنـد یعنی یك پرتو نور را به صورت دوپرتو می‌شکنند ونوشته‌ها یا اشیاءکوچك ازپشت این بلورها مضاعف دیده می‌شوند. نیوتن که معتقد به فرضیه ذره‌ای نور بود این رفتار نور را مربوط به‌شکل و ابعاد مختلف ذرات نور می‌دانست. در سال۱۸۲۰ میلادی یانگ وفرنل بااستفاده ازتئوری موجی نورتوضیح کاملتری درباره پلاریزاسیون‌آن دادند و استدلال کردندکه برای‌توجیه پدیده پلاریزاسیون باید قبول کردکه ارتعاشات نورعرضی هستندیعنی درهرنقطه از پرتونور راستای ارتعاش برراستای آن پرتو عمود است (قبلاً دانشمندان عموماً عقیده داشتندکه امواج نورمانند امواج‌صوت باید طولی باشند). شما درکتاب فیزیك سال دوم دوره نظری باپدیده پلاریزاسیون آشنا شده‌ایـد. دراین بخش مطالب بیشتری در این باره خواهید آموخت.

۱ـ Polarization

قطبی شدن یا پلاریزاسیون نور

نورطبیعی درراستای انتشار خود دارای تقارن است، یعنی دسته پرتو نوری که ازیك چشمه نور در محیط همگن وایزوتروپ گسیل می‌شود دارای تقارن است .

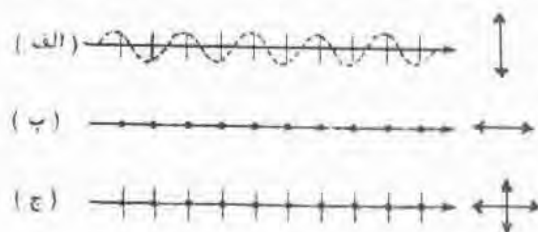
بطور کلی درحالتی که موجها طولی هستند امتداد ارتعاشها همواره‌موازی با راستای‌انتشاراست بطوری که درصفحه عمود برراستای انتشار حرکتی وجود ندارد و تقارن کامل است. ولـی اگر موجها عرضی باشند امتدادهـای ارتعاش عمود بر راستای انتشاراست. این بدان معنی نیست که ارتعاش همیشه دریك امتداد است بلکه ممکن‌است درهرامتدادواقع درسطح عمود برراستای انتشارباشد. بنابراین ممکن است دراطراف یك راستای انتشار، تقارن‌کامل‌وجود داشته باشد (مانند شکل ۱۵-۱) یا نداشته باشد. اگربرای یك دسته پرتو نور تقارن‌کامل وجود نداشته باشد گفته می‌شودکه این دسته پرتوقطبی یا پلاریزه است. مثلاً خواهیم دید که بازتابش نور طبیعی از



شکل ۱۵-۱- دریك پرتو نور طبیعی بردارهای ارتعاش در تمام امتدادهای سطح موج وجود دارد وحالت تقارن کامل برقراراست.

روی سطح جداگـر دو محیط شفاف ایزوتروپ و همگن سبب می‌شودکه نورکیفیت تقارن را ازدست بدهد، یعنی پلاریزه شود.

اگردریك دسته پرتو بوسیله‌ای همه راستاهای ارتعاش درصفحه‌های موازی یکدیگر قرار گیرند در این صورت می گویند «پلاریزاسیون درصفحه» است. درشکل ۱۵-۲، نمودار الف معرف پلاریزاسیون در



شکل ۱۵-۲

الف. نمودار موج پلاریزه‌ای است‌که بردار ارتعاشات آن درامتداد قائم است.

ب. نمودار موج پلاریزه‌ای است‌که بردار ارتعاشات آن در امتداد افق است.

ج. نمودار موج غیرپلاریزه (طبیعی) است.

صفحه قائم و نمودار ب معرف پلاریزاسیون درسطح افقی ونمودار ج معرف نورطبیعی یاغیرپلاریزه‌است.

نورطبیعی را می‌توان با روشهای زیر به نور پلاریزه تبدیل کرد:

۱- بازتابش.
۲- شکست مضاعف.
۳- جذب انتخابی.
۴- پراکندگی.

پلاریزاسیون به وسیله بازتابش

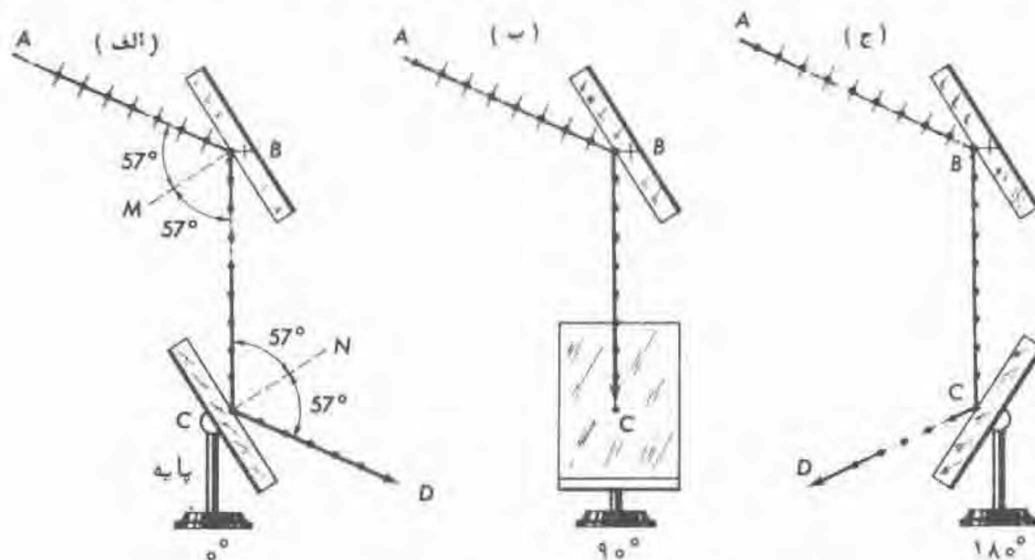
اگریك‌دسته پرتونورطبیعی‌تحت‌زاویه ۵۷درجه به سطح صیقلـی یك شیشه مسطح بتابد، دسته پرتو بازتابیده به‌صورت نور «پلاریزه‌درصفحه» درمی‌آید.

این واقعیت را مالوس[1]، فیزیکدان فرانسوی، برای اولین بار درسال ۱۸۰۸ میلادی کشف کرد. آزمایش مربوط به این کشف مهم درشکل ۱۵-۳ نشان داده شده است.

دسته پرتونورطبیعی AB تحت‌زاویه ۵۷ درجه درنقطهB بهسطح شیشه بالایی می‌تابد وپس‌ازبازتابش ازروی این شیشه، باهمان زاویه ۵۷ درجه، در نقطه C بهسطح شیشه دیگری‌که موازی باشیشه اولی‌است می‌تابد و دوباره منعکس می‌شود (شکل الف) اگر شیشه پائینی را با چرخاندن پایه‌اش به آرامی حول محور BC بچرخانیم شدت نوربازتابیده ازروی‌آن (یعنی دسته پرتو CD) به تدریج کاهش می‌یابد و هنگامی‌که زاویه دوران به ۹۰ درجه‌برسد دسته‌پرتو CD ازبین می‌رود، یعنی شدت‌آن صفرمی‌شود. اگر چرخانیدن پایه شیشه پائینی را ادامه دهیم پرتوCD دوباره ظاهر شده و شدت آن به تـدریج افزایش می‌یابد وموقعی که زاویه‌دوران به ۱۸۰ درجه‌می‌رسد شدت دسته پرتو CD بهماکزیمم مقدارخودمی‌رسد. اگر باز هم بهدوران پایه ادامه دهیم در ۲۷۰ درجه شدت این دسته پرتو دوباره به صفر ودر ۳۶۰ درجه به ماکزیمم خود خواهد رسید. بدیهی است در تمام مدت این‌آزمایش‌زاویه‌های تابش‌نور بردوشیشه‌بالایی وپائینی همواره ثابت وهریك برابر ۵۷ درجه است.

اگرزاویه تابش روی دوشیشه ۵۷ درجه نباشد شدت دسته پرتو CD مانند حالت قبل به ازای هر دوران ۹۰ درجه می‌نیمم وماکزیمم خواهد شد ولی می‌نیمم آن دیگرصفرنخواهد بود.

دراین‌آزمایش اگرشیشه بالایی را بچرخانیم هیچ تغییری درشدت نور CD ظاهرنخواهد شد. از اینرو می‌توان نتیجه‌گرفت‌که دسته پرتو BC، (باز



شکل ۱۵-۳ آزمایش برای نشان دادن پلاریزاسیون نور به وسیله بازتابش

1_ Etienne Malus

تابیده ازروی شیشه بالایی) با دسته پرتوطبیعی AB متفاوت است . به عبارت دیگر دسته پرتو AB که بر شیشه اول می‌تابد معمولاً پلاریزه نیست و به‌طوری که گفتیم در راستای انتشار خود دارای تقارن کامل است. بازتابش آن ازروی این شیشه سبب می‌شود که حالت تقارن را در راستای انتشار خود از دست بدهد، به‌عبارت دیگر پلاریزه شود. شیشه بالائی، که نور طبیعی را به نور پلاریزه تبدیل می کند «پلاریزه کننده[1]» وشیشه‌پایینی که به‌وسیله آن پدیده‌پلاریزاسیون تحقیق می‌شود «تجزیه‌کننده[2]» نامیده می‌شود.

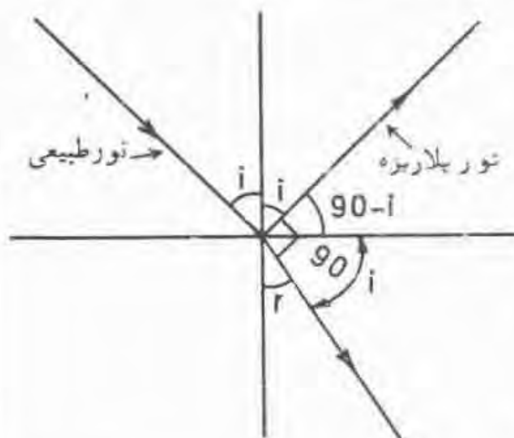
پرسش ۱۵-۱ - در پلاریزاسیون به وسیله بازتابش درچه صورت پلاریزاسیون کامل است؟

قانون بروستر[3]

وقتی یك دسته پرتو نور به‌سطح جسم شفافی مانندآب‌یاشیشه می‌تابدقسمتی‌از آن‌ازسطح آب‌یاشیشه بازمی‌تابد وقسمت دیگردر آن‌شکست می‌یابدآزمایش نشان می‌دهد که نور بازتابیده، در حالتی که زاویه تابش غیرمشخص است، به‌طور جزئی پلاریزه است (یعنی پلاریزاسیون درصفحه نیست) ودرحالت‌خاصی که زاویه تابش برابرمقدار مشخصی باشد (مثلا برای آب ۵۳ درجه وبرای شیشه ۵۷ درجه) پرتوبازتابیده کاملا پلاریزه است (یعنی پلاریزاسیون در صفحه است). این زاویه را «زاویه پلاریزاسیون» می‌نامند .

بروستر، فیزیکدان اسکاتلندی، برای نخستین بارکشف کردکه درهرجسم شفاف برای آن که پرتو باز تابیده کاملا پلاریزه شود باید این پرتو بر پرتو شکست یافته عمود باشد (قانون بروستر ، شکل ۱۵-۴).

در این حالت می‌توان بین زاویه پلاریزاسیون



شکل ۱۵-۴- نور بازتابیده از سطح یك محیط شفاف، وقتی که زاویه تابش برابر زاویه پلاریزاسیون باشد کاملاً پلاریزه است.

($\hat{i}$) و ضریب شکست محیط شفاف (n) روابط زیررا نوشت:

$$\hat{i} + \hat{r} = ۹۰$$

$$\hat{r} = ۹۰ - \hat{i}$$

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i}{\sin(۹۰ - i)} = \frac{\sin i}{\cos i}$$

یا :

$$\boxed{tg\,\hat{i} = n} \qquad (۱-۱۵)$$

یعنی تانژانت زاویه پلاریزاسیون برابر ضریب شکست محیط شفاف است.

۱_ Polarizer ۲_ Analyzer ۳_ Brewster

فرمول ۱۵-۱ برای محاسبه زاویه پلاریزاسیون به کار می‌رود. مثلاً برای آب با $n = ۱/۳۳$ این زاویه برابر ۵۳ درجه و برای شیشه با $n = ۱/۵۴$ این زاویه ۵۷ درجه است.

مثال - نور زرد به سطح صاف یك شیشه از جنس فلینت متراکم باضریب شکست، $n = ۱/۶۶۴$ می‌تابد. زاویه پلاریزاسیون را برای این شیشه حساب کنید.

داریم: $tg\,\hat{i} = n$

به‌ازاء $n = ۱/۶۶۴۰$ خواهیم داشت:

$$tg\,\hat{i} = ۱/۶۶۴۰$$

و $$\hat{i} = ۵۹^\circ$$

پرسش ۱۵-۲ - اگر نور طبیعی به یك آینه معمولی بتابد آیا بازتابش آن پلاریزه است؟

پلاریزاسیون در اثر شکست مضاعف نور

درسال ۱۶۶۹ فیزیکدان سویسی «اوراسموس بارتولینوس[۱]» کشف کرد که اگر یك دسته پرتو نور طبیعی از بلوراسپات دیسلاند (بلور کربنات کلسیم یا کلسیت) بگذرد پس از شکست به‌دودسته پرتو تجزیه میگردد و نوشته‌ها ازپشت آن مضاعف دیده می‌شوند (شکل ۱۵-۵).

این موضوع بعدها توسط هویگنس و نیوتن مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد که تقریباً تمام اجسام بلوری می‌توانند مانند «کلسیت» یك‌دسته نور موازی را به دودسته نور منکسر تبدیل کنند. برای نمونه کوارتز، میکا، یاقوت زرد، سلنیت[۲]، آرگونیت[۳] ویخ دارای این خاصیت می‌باشند.

کلسیت و کوارتز از این نظر اهمیت خاصی دارند که ازآنها برای ساختن بعضی ابزارهای نوری استفاده می‌شود. در شکل ۱۵-۶ بلورهای کلسیت و کوارتز نشان داده شده است.

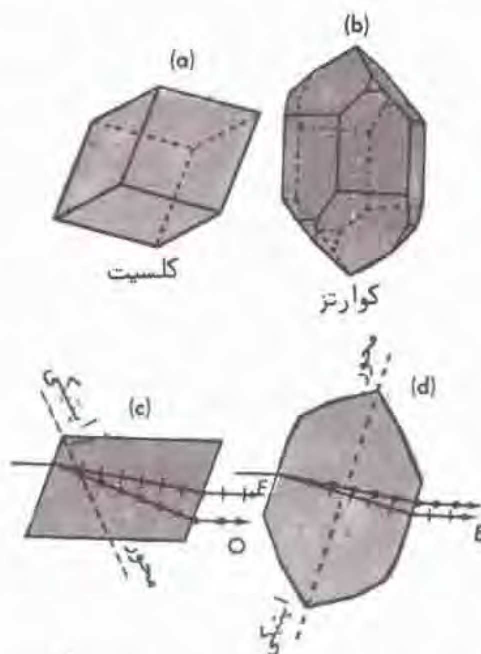
دوشعاع نوری که دراثرشکست مضاعف حاصل شده‌اند هر دو پلاریزه می‌باشند ولی یکی از آنها از قوانین شکست پیروی می‌کند که آن را شعاع عادی گویند ودیگری ازقوانین شکست نورپیروی نمیکند و شعاع غیرعادی نامیده می‌شود.



شکل ۱۵-۵
از پشت بلورکلسیت نوشته‌ها مضاعف دیده می‌شوند.

داخل هر بلور فقط یك امتداد مخصوص وجود دارد که در آن امتداد، پدیده شکست مضاعف پیش نمی‌آید. این امتداد مخصوص «محور اپتیکی» نامیده می‌شود ودرشکل ۱۵-۶ با خط چین نشان داده شده است.

۱- Erasmus-Barthalinus ۲- Selenite ۳- Aragonite

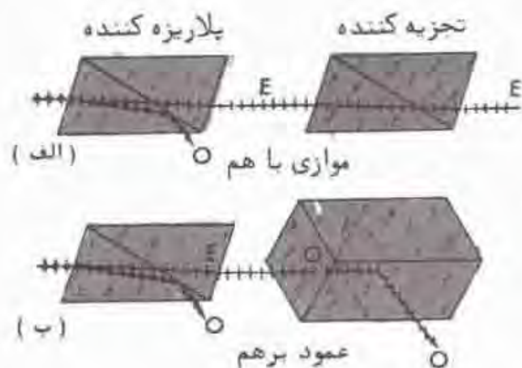


شکل ۱۵-۶- شکل و سطح مقطع بلورهای کوارتز و کلسیت که پدیده انکسار مضاعف و پلاریزاسیون را نشان می‌دهند.

منشور نیکول

این منشور که از بلور کلسیت توسط نیکول[۱] ساخته شده‌است و سیله‌ای برای تولید یا شناخت نور پلاریزه می‌باشد. برای ساختن منشور نیکول یك بلور کلسیت را در امتداد قطر آن برش می‌دهند. سپس قطعات بدست آمده را بوسیله صمغ مخصوصی بنام صمغ کانادا[۲] بهم می‌چسبانند. ضریب شکست این صمغ $n = ۱/۵۵$ می‌باشد که ازضریب شکست‌بلور کلسیت برای شعاع عادی $(n_O = ۱/۶۵۶)$ کمتر و ازضریب‌شکست برای‌شعاع غیرعادی $(n_E = ۱/۴۸۲)$ بیشتر است.

وقتی مطابق شکل ۱۵-۷ شعاع های عادی و غیرعادی به‌صمغ کانادا می‌رسد شعاع عادی‌بازتابش کلی می‌یابد ولی شعاع غیر عادی از آن می‌گذرد و درامتداد موازی با اشعه تابش ازمنشور خارج‌می‌شود. می‌توان پلاریزه بودن این شعاع نوررا که از منشور نیکول عبور کرده است با یك تجزیه کننده تحقیق کرد.



شکل ۱۵-۷

دو منشور نیکول پلاریزه‌کننده و تجزیه‌کننده

پلاریزاسیون دراثرجذب انتخابی

وقتی شعاع نور طبیعی وارد بلور تورمالین[۳] شود، درآن مانند بلورنیکول پدیده شکست مضاعف روی می‌دهد، بااین تفاوت که شعاع عادی‌آن بطور کامل درداخل بلور جذب شده وفقط شعاع غیر عادی

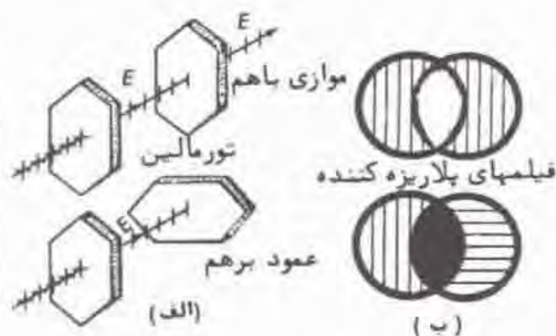
۱- Nicol

۲- Canada balsam

۳- تورمالین، سیلیکات مرکب آلومینیم و بور است. رنگ آن برحسب نسبت مواد متشکله متفاوت است. تورمالین بصورت سنگ‌های قیمتی برنگ‌های سبز، صورتی، قرمز، آبی و بنفش موجود است. بلورهای تورمالین اغلب سوزنی شکل می‌باشند.

آن خارج می‌شود. در این پدیده که «جذب انتخابی» نامیده می‌شود بلور تورمالین، ارتعاشات موجود در یك سطح را جذب می‌کند و ارتعاشات سطح دیگر را عبور می‌دهد.

چنانچه مطابق شکل ۱۵ــ۸ــ الف دو بلور تورمالین بطور موازی در مجاورت یکدیگر قرار گیرند، نور پلاریزه شده ازبلور اول وارد بلور دوم شده و با جزئی کاهش شدت از آن می‌گذرد. ولی اگر بلور دوم را ۹۰ درجه بچرخانیم، نور پلاریزه توسط بلور اول را جذب می‌کند.



شکل ۱۵ــ۸ــ در این شکل پلاریزاسیون نور بوسیله تورمالین و فیلمهای پلاروید نشان داده شده است.

خاصیت تورمالین و بلورهای دیگر مشابه آن مربوط به ساختمان ملکولی آنها است.

بعنوان مثال می‌توان گفت که، عبور نور از ملکولهای تورمالین مانند عبور شخصی است که میله بلندی در دست داشته و بخواهد از باغی که در آن روی خطوط مشخصی درختکاری شده‌است عبور کند. چنانچه این شخص میله را در امتداد افقی و عمود بر راستای حرکت خود بگیرد، درختها مانع حرکت او می‌شوند در صورتیکه میله را در امتداد قائم قرار دهد بسهولت می‌تواند از میان درختهای باغ عبور کند.

تورمالین را نمی‌توان به‌جای منشور نیکول‌در اسبابهای اپتیکی به‌کاربرد زیرا رنگ بلورهای آن زرد است و مانع عبور نور سفید می‌شود.

ماده مناسبتری که برای این‌منظور به‌کارمی‌رود و نور سفید را از خود عبور می‌دهد ماده مصنوعی «پلاروید[1]»است. پلاروید از بلورهای کوچك‌سوزنی‌ــ شکل یدوسولفات کینین که نام صنعتی‌آن هراپاتیت[2] است ساخته می‌شود: این بلورها را پهلوی‌هم به‌طور موازی‌درخمیری از نیترو سلولز قرارداده و به‌صورت فیلمهای‌نازك عرضه‌می‌کنند؛ چون‌این‌بلورهاهمه‌موازی هم‌می‌باشند رفتارشان درمقابل نوریکسان است. این بلورها مانند تورمالین رفتار می‌کنند یعنی یکی از پرتوهای مضاعف پلاریزه‌را جذب می‌کنند و دیگری را عبور می‌دهند.

شکل ۱۵ــ۸ــب، دو فیلم پلاروید را نشان می‌دهد که هر یك جداگانه درون یك حلقه میان دو صفحه شیشه‌ای نازك قرارداده شده است. هرگاه دو فیلم در مقابل یکدیگر طوری قرارگیرند که بلورها موازی هم‌باشند نور از هردو می‌گذرد و اگر بلورها برهم عمودباشند نور عبورنمی‌کند. پلارویدها عملاً موارد کاربرد زیاد دارند به‌ویژه در مواردی‌که نور مزاحم، چشم را خیره می‌کند مانند بازتابش نور از روی صفحه کتاب، شیشه پنجره، برف، سطح آب، آسفالت‌جاده به‌هنگام‌رانندگی یانوربالای‌اتومبیل‌های

1ــ Polaroid　2ــ Herapathite

مقابل و .... چنانچه از فیلمهای پلاروید به صورت عینك استفاده شود نور پلاریزه شده و قسمتی از آن حذف می‌شود.

پرسش ۱۵-۳- آیا می‌توان پلاروید را بـه عنوان صافی در دستگاه عکاسی به هنگام گرفتن عکس به‌کار برد؟

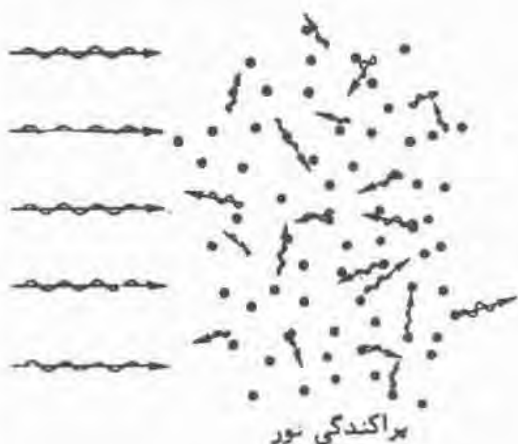
چرا آسمان آبی رنگ است؟

رنگ آبی آسمان و رنگ قرمز افق به‌هنگام غروب خورشید، مربوط به پدیده‌ای است که به آن «پراکندگی»[1] می‌گویند. وقتی نور خورشید از جو زمین می‌گذرد ملکولهای هوا که در مسیر آن هستند مقدار زیادی از انرژی آن را گرفته و در جهت‌های دیگر پراکنده می‌سازند، این عمل بسیار شبیه به اثر امواج‌آب روی اشیاء شناور است، مثلاً اگرامواج تولید شده برسطح‌آب به چوب‌پنبه کوچکی که‌برآن شناور است، برخورد کنند چوب‌پنبه با همان فرکانس امواج آب بالا و پایین می‌رود.

نور نیز به‌همین طریق روی ملکولهای هوا و ذرات غبار معلق در‌آن عمل می‌کند: هرملکول یا هر ذره غباری‌که توسط امواج نور به‌ارتعاش درمی‌آید نور جذب شده را دوباره، گاهی در همان جهت و معمـولاً در جهت دیگر گسیل می‌دارد. این کیفیت در شکل۱۵-۹ به‌طور ساده نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که امواج نور به طور اتفاقی در همه جهات پراکنده شده‌اند.

به‌طور کلی هر چه طول موج نسبت به ابعاد ذرات بزرگتر باشد میزان پراکندگی موج به وسیله آنها کمتر است. در مورد ذراتی که ابعادشان ازطول موج کوچکتراست مقدار پراکندگی نورباتوان‌چهارم طول موج نسبت عکس دارد یعنی:

$$\text{پراکندگی} \ \alpha \frac{1}{\lambda^4}$$



شکل ۱۶-۸- امواج نوری به‌وسیلهٔ ملکول‌های هوا پراکنده می‌شوند.

مثلاً طول موج نور قرمز تقریباً دو برابرطول موج نور آبی است بنابراین، مقدار پراکندگی نورقرمز تقریباً $\frac{1}{16}$ مقدار پراکندگی نور آبی است . اکنون می‌توانیم دریابیم که چرا آسمان آبی رنگ است: نور خورشید به وسیله ملکولهای هوا و ذرات گرد و غبار معلق در آن پراکنده می‌شود. قطر این ذرات کوچکتر از طول موجهای نور مرئی است بنابراین نور با طول موجهای کوتاه ــ آبی، نیلی، بنفش ــ بیشتر پراکنده می‌شود. وقتی به‌آسمان نگاه می‌کنیم

1 — Scattering

همین نور بیشتر پراکنده است که به‌چشم ما می‌رسد و اثر این ردیف طول موجها برچشم، احساس رنگ آبی است.

اینك درنظر بگیریم که به‌منظره غروب‌خورشید در روزی که هوا مه‌آلود یا پرگرد و غباراست نگاه می‌کنیم، دراین وضعیت‌پرتوهایی‌را دریافت‌می‌کنیم که رنگهای ردیف آبی‌آن کلاً به‌خارج پراکنده‌شده‌اند ولی رنگهای با طول موج بزرگترپراکنده نشده‌اند، در نتیجه خورشید را قرمز رنگ می‌بینیم.

اگر زمین بدون‌آتمسفر بودآسمان سیاه به‌نظر می‌رسید وستارگان در روز دیده می‌شدند. مثلاً اگر تا ارتفاع حدود ۲۰کیلومتر ازسطح زمین بالا رویم درآنجا هوا بسیار رقیق می‌شود وآسمان سیاه به‌نظر می‌رسد و ستارگان ممکن است در روز دیده شوند (همچنانکه فضانوردان دریافته‌اند). گاهی‌هوا محتوی ذرات گرد وغبار یا قطرات آب بزرگتر ازطول‌موج نور (مثلاً حدود میکرون یا ۶-۱۰ متر) ممکن است باشد. دراین‌صورت رنگهای غیر از ردیف آبی بیشتر پراکنده می‌شوند، کیفیت رنگی‌آسمان با میزان بخار آبی که در هوا است تغییر می‌کند. درهوای خشك و صاف، عمق‌آسمان آبی بیشتر از وقتی به‌نظرمی‌رسد که هوا صاف ولی مرطوب است. لایه گرد و غبار آبی مایل به خاکستری کـه آسمان اغلب شهرهای بزرگ را می‌پوشاند معمولاً بـه سبب پخش مواد حاصل ازسوخت اتومبیلها وکامیونها وکارخانجات و منازل و غیره درهواست. بیشتر این ذرات نامرئی و دارای ابعادی بین ۰/۰۰۵ تـا ۱ میکرون هستند. این ذرات زمینه‌ای را فراهم می‌سازند کـه در آن گازها وذرات‌مایعات و جامدات کوچکتر به‌هم‌چسبیده و ذرات بزرگتری را تشکیل می‌دهند و این ذرات بزرگتر نور را پراکنده می‌سازند.

جاذبه زمین‌روی‌ذرات معلق درهوا اثرچندانی ندارد. اگر برف و بارانهای متوالی یا باد آنها را با خود نبرندآلودگیهای ناشی از دود و ذرات معلق در هوا درآب و هوا و سلامتی انسان اثر زیان‌بخش خواهند داشت.

به این پرسشها پاسخ دهید

۱) چه پدیده‌ای دلیل برعرضی بودن امواج نور است؟ چرا؟

۲) تفاوت نور طبیعی با نور پلاریزه چیست؟

۳) با چه روشهایی می‌توان نورطبیعی را به‌نور پلاریزه تبدیل کرد؟

۴) قانون بروستر چیست؟

۵) منظور از پلاریزاسیون در اثر شکست مضاعف چیست؟ شرح دهید.

۶) منشور نیکول را چگونه تهیه می‌کنند؟ چرا شعاع غیرعادی از منشور نیکول می‌گذرد ولی شعاع عادی از آن نمی‌گذرد؟

۷) چگونه رنگ آبی‌آسمان را توجیه می‌کنید؟ چه انتظار دارید اگر آسمان را از سطح

کره ماه ببینید؟ چرا؟

۸ـ پراکندگی امواج نور بوسیله موانع کوچك چه بستگی با طول موج دارد؟

۹ـ درنظر بگیرید که منشوری از بلور کلسیت دارید که محور اپتیك آن موازی باخط‌الرأس منشوراست. هرگاه یك‌دسته پرتو نورسفید به یکی از وجوه این منشور بتابانید چه پدیده‌ای اتفاق می‌افتد؟ با رسم شکل توضیح دهید.

این مسئله‌ها را حل کنید

۱ـ زاویه پلاریزاسیون را برای نور سبز به طول موج $\lambda = ۵۵۰۰ A^\circ$ که از روی بلور تی‌تانیا ($TiO_۲$ ، دی‌اکسیدتیتان) باز می‌تابد حساب کنید. ضریب شکست این بلور برای آن‌نور ۲/۹۴۶۰ است.

۲ـ نور قرمز بریك کریستال الماس می‌تابد. با توجه به اینکه برای این‌نور $n = ۲/۴۱$ است زاویه پلاریزاسیون‌آن را حساب کنید.

۳ـ زاویه پلاریزاسیون برای‌نورآبی که بهسطح یك‌شیشه فلینت می‌تابد ۵۹/۳ درجه‌است ضریب شکست این شیشه را پیدا کنید.

جواب ۱/۶۸۴۲

۴ـ فرض کنید زاویه حدشکست برای یك‌قطعه شیشه ۴۵ درجه است ضریب شکست‌وزاویه پلاریزاسیون آن را حساب کنید.

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۵

۱۵ـ۱)ـ درصورتی که زاویه‌تابش ۵۷درجه‌باشد، در غیراین‌صورت‌می گویند پلاریزاسیون جزئی است.

۱۵ـ۲)ـ بلی، ولی بهطور جزئی نه‌کامل. بعلاوه دراین‌حالت پرتو شکست وجود ندارد.

۱۵ـ۳)ـ بلی ، در مواردی که نور منعکس مزاحم است و باید شدت آن کاسته شود.

۱۶

جریانهای با تواتر زیاد
امواج الکترومانیتیک

ارسال علامات تلگرافی به وسیله بی‌سیم ، صدا توسط رادیو و صدا وتصویر بەوسیله تلویزیون ازکارهای مهم انسان در عصر حاضر است. امواج الکترومانیتیک‌که این علامات واصوات و تصاویررا در هوا ودرفضای بین سیارات با سرعت نور (یعنی نزدیك بەسیصد هزار کیلومتر درثانیه) حمل می‌کند پدیده‌ای شگفت انگیز است.

دراین فصل نخست جریانهای با تواترزیاد ومدار نوسان‌کننده راکه درصنعت الکترونیك ورادیوالکتریسیته به‌کارمی‌روند به‌اختصار مورد بحث قرارمی‌دهیم سپس مروری کوتاه براموج الکترومانیتیك و دامنه کاربردآنها خواهیم داشت[1].

خواص جریانهای با تواتر زیاد

با پیشرفت روزافزون‌صنعت‌الکترونیك، امروزه به‌آسانی جریانهای الکتریکی سینوسی با تواترپسیار زیاد (تاحدود 10^{12} هرتز) تولید می‌شود.

اصطلاح «تواترزیاد» (یا «فرکانس بالا[2]» یا «پربسامد») به فرکانسهایی تعلق می‌گیردکه از 10^{5} هرتز بیشترند و موارد کاربرد متعددی در صنعت الکترونیك ورادیو الکتریسیته دارند.

طبیعت جریان با تواتر زیاد، تفاوتی باجریان با تواترکم (مثلا برق شهرباتواتر ۵۰ هرتز) ندارد، یعنی وقتی از هادیهای فلزی مـی‌گذرد الکترونهای آزاد را با همان فرکانس خود با دامنه‌کم به‌نوسان

۱ـ بحث دربـاره طرز کار رادیو و تلویزیون و بی‌سیم خارج از برنامه این کتاب است شماچنانچه علاقمند باشید می‌توانید به کتابهای اختصاصی‌که به فارسی هم نوشته شده است مراجعه کنید.

۲ـ در صنعت الکترونیك ورادیوالکتریسیته فرکانس بالا (یا تواتر زیاد) را با علامت‌اختصاری HF نمایش می‌دهند.

درمی‌آورد .

تعاریف شدت مؤثر ، اختلاف پتانسیل مؤثر ، مقاومت ظاهری (امپدانس)، توان‌متوسط و... درباره جریانهای با تواتر زیادنیزصادق است. ولی تغییرات بسیار سریع شدت جریان لحظه‌ای، به جریانهای با تواترزیاد خواص ویژه‌ای داده است‌که کاربردآنها را متمایز می‌سازد وما پاره‌ای ازاین خواص رابیان خواهیم‌کرد.

۱- اثرخودالقا وظرفیت برجریانهای با تواترزیاد

الف- می‌دانیم امپدانس، یا مقاومت ظاهری ، یك سیم پیچ به سه‌کمیت R (مقاومت حقیقی‌آن) و L (ضریب خودالقایی یااندوکتانس‌آن) و ω (تپش جریان متناوبی کـه از آن می‌گذرد) بستگی دارد یعنی :

$$Z=\sqrt{R^{2}+L^{2}\omega^{2}}$$

چون $\omega=2\pi f$ متناسب با تواتر f است، جمله $L^{2}\omega^{2}$ برای تواترهای زیاد آن قدر بزرگ است که R^{2} در مقابل آن ناچیز می‌باشد بنابراین مقاومت ظاهری Z عملا متناسب با تواتر f خواهد بود :

$$Z\approx L\omega=2\pi Lf \qquad (1-16)$$

که اگـر L کوچك هم باشد معمولاً Z بسیار بزرگ است. مثلا بازای $L=10^{-4}$ هانری و $f=10^{8}$ هرتز:

$$Z=2\times 3/14\times 10^{-4}\times 10^{8}\simeq 63000\Omega$$

بنابراین یك سیم پیچ با چند دور سیم کلفت مسی که درمقابل‌جریان‌مستقیم مقاومتی‌ندارد وامپدانس آنهم‌برای جریان متناوب معمولی (۵۰ هرتز) بسیار کم است، درمقابل عبورجریان با تواترزیاد، مقاومت بسیار از خود نشان می‌دهد و به اصطلاح جریان را «خفه» می‌کند.

ب- مقاومت ظاهری یك خازن یعنی:

$$Z=\frac{1}{C\omega}=\frac{1}{2\pi Cf}$$

برخلاف امپدانس سیم‌پیچ خودالقا، با عکس تواتر f متناسب است وممکن است برای تواترهای زیاد بسیارکوچك باشد حتی اگر C (ظرفیت‌خازن) کوچك انتخاب شود. مثلا به ازای:

$$C=10^{-2}\mu F=10^{-8}F$$

اگر $f=10^{8}$ هرتز باشد:

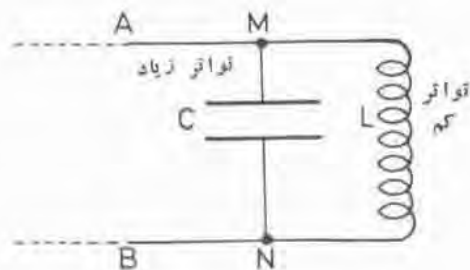
$$Z=\frac{1}{2\times 3/14\times 10^{-8}\times 10^{8}}\approx 0/16\Omega$$

ولی اگر $f=50$ هرتز باشد:

$$Z=\frac{1}{6/28\times 10^{-8}\times 50}\approx 3200000\Omega$$

درصنعت رادیوالکتریسیته، وقتی‌که می‌خواهند جریان متناوب با فرکانس‌کم وجریان با تواتر زیاد را که با هم در یك مدار تولید می‌شوند از یکدیگر جدا کنند، یك سیم پیچ و یك خازن را مطابق شکل ۱۶-۱ بطور موازی در مدار می‌بندند . این‌گونه مدارها برای عبور دادن یا متوقف ساختن جریان با تواتر مورد نظر درحکم صافی هستند.

پرسش ۱۶-۱- آزمایش‌نشان می‌دهد‌که هنگام عبور جریان با تواترزیاد از یك هادی فلزی، جریان فقط ازرویه هادی میگذرد ودروسط هادی عملاجریان وجود ندارد. آیا می‌توانید علت را توضیح دهید؟

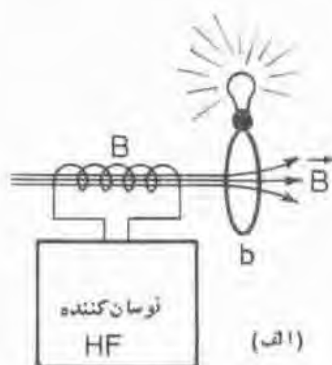


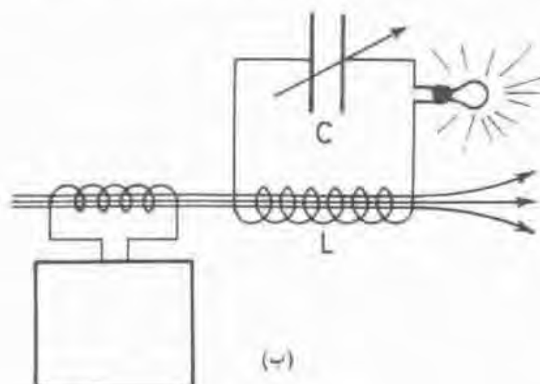
شکل ۱۶-۱- دو جریان یکی با تواتر کم و دیگری با تواتر زیاد در AM و BN با هم وجود دارند. این جریانها در نقاط M و N از یکدیگر جدا می‌شوند. جریان با تواتر کم عملاً از سیم پیچ L می‌گذرد وجریان با تواتر زیاد از شاخه شامل خازن C عبور می‌کند.

۲- اثر القایی جریان با تواتر زیاد- هرگاه از یك سیم پیچ، متشکل از چند حلقه سیم کلفت، جریان با تواتر زیاد (که توسط یك نوسان‌کننده الکتریکی تولید می‌شود) عبوردهیم ودرمیدان مغناطیسی حاصل ازاین جریان، در نزدیکی سیم‌پیچ مدار گیرنده‌ای را که مثلا ازیك سیم کلفت به‌شکل حلقه ساخته‌ایم و دو سرآنرا به‌یك لامپ الکتریکی کوچك وضعیف (مثلا دوولتی) بسته‌ایم قراردهیم لامپ روشن‌می‌شود ونشان می‌دهدکه جریان القایی تولید شده در مدار گیرنده حلقه‌ای شکل به اندازه‌ای است که می‌تواند لامپ کوچك را روشن‌کند (شکل۱۶-۲ ـ الف. در این شکل سیم پیچ باحرف B ومدار گیرنده با حرف b مشخص شده است).

علت این پدیده، چنانکه می‌دانیم، تغییر بسیار سریع شار مغناطیسی است که از سطح حلقه b می‌گذرد.

درنظر بگیریم جریانی که ازسیم‌پیچ B می‌گذرد (وبه وسیله نوسان‌کننده با تواتر زیاد تولید می‌شود) یك جریان سینوسی باتواتر f باشد. اندوکسیون (یا شدت‌میدان‌مغناطیسی) $\vec{B}$ که دراطراف سیم‌پیچ ایجاد می‌شود با f متناسب است و درنتیجه شار مغناطیسی که از مدار b می‌گذرد (و با شدت جریان متناسب





شکل ۱۶-۲- آزمایش برای نشان دادن اثر القائی جریان با تواتر زیاد. در شکل ب شدت مؤثر جریان القایی بستگی به ظرفیت C خازن دارد و درحالت تشدید، یعنی به ازای $C=\frac{1}{L\omega^2}$ این شدت ماکزیمم و بنابراین روشنائی لامپ ماکزیمم است.

می‌باشد) نیز با f متناسب است. بنابراین شار مغناطیسی لحظه‌ای را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\varphi = \varphi_m \sin \omega t = \varphi_m \sin ۲\pi f t$$

تغییرات این شار در مدار b نیروی محرکه القایی ایجاد می‌کند که مقدارآن درهر لحظه ازرابطه زیرحساب می‌شود.

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -۲\pi f \varphi_m \cos ۲\pi f t$$

$$= E_m \cos ۲\pi f t$$

ومقدار مؤثرآن برابراست با :

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{۲}} = \frac{۲\pi f \varphi_m}{\sqrt{۲}} \qquad (۲-۱۶)$$

ملاحظه می‌شود که نیروی محرکه مؤثر القایی حاصل از جریان با تواتر زیاد در یك مدار گیرنده، متناسب با تواتر f بوده و مقدار آن برای جریانهای با تواتر بسیار زیاد قابل توجه است حتی اگر φ_m کوچك باشد.

اینك به جای حلقه b، یك مدار «RLC» شامل خود القایی L و خازن متغیر C قرار می‌دهیم (شکل ۱۶-۲ ـ ب). نقش نیروی محرکه القایی e که در اثـر تغییر شار مغناطیسی در این مدار تولید می‌شود همانند نقش اختلاف پتانسیل متناوبی است که در غیاب دستگاه نوسان کننده، با همین تواتر f بین دونقطه ازاین مدار (که بین‌آن دونقطه مدارقطع شده باشد) برقرار می‌شود.

دربخش ۱۳ دیدیم که درچنین مداری شدت جریان و اختلاف فازآن با نیروی محرکه القایی (یا با اختلاف پتانسیل) بستگی به اثرهای متضاد خودـ القای L و ظرفیت C دارد و درحالتی که :

$$LC\omega^۲ = ۱ \quad \text{یا} \quad L\omega = \frac{۱}{C\omega}$$

باشد مـدار در حالت تشدید است. دراین حالت اختلاف فازصفرشده وشدت جریان مؤثر به‌ماکزیمم مقدارخود می‌رسد که هرچه مقاومت مدار کمتر باشد این شدت بیشتر است.

حالت تشدید در مدار گیرنده را می‌توان با تغییردادن ظرفیت C خازن متغیر به‌وجودآورد. دراین حالت تواتر نوسانات الکتریکی در مدار گیرنده که طبق رابطهٔ :

$$۴\pi^۲ f^۲ LC = ۱ \qquad (۳-۱۶)$$

بستگی به L و C دارد، برابرتواترنوسانات‌دستگاه نوسان کننده است.دراین‌صورت می گویند مدارگیرنده «RLC» روی فرکانس f جور شده است.

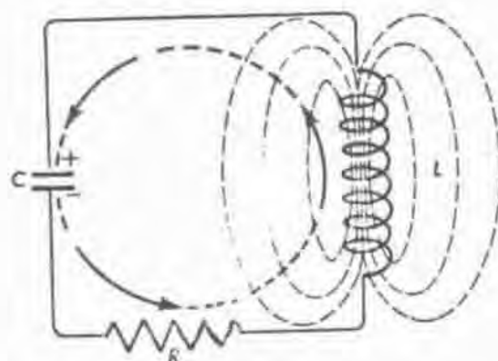
پرسش ۱۶-۲ - اگر مقاومت مدار گیرنـده نسبتاً زیاد باشد آیا درآن نوسان الکتریکی به‌وجود می‌آید؟

مدار نوسان‌کننده

یك مدار، متشکل ازخود القای L وظرفیتC، که طرح ساده‌ای ازآن در شکل ۱۶-۳ نمایش داده شده است مـدار نوسان کننده‌ای است به نام «مدار LC» که درآن تخلیه بار الکتریکی خازن به‌صورت نوسانات سینوسی میرا (مستهلك شونـده) انجام می‌گیرد.

درنظربگیریم که خازن ازابتدا پرشده ومطابق آنچه در شکل ۱۶-۳ نشان داده شده است، صفحه بالایی‌آن بارمثبت وصفحه پایینی‌آن‌بار منفی دارد و در آستانه تخلیه در مـدار است. به هنگام تخلیه، الکترونهای اضافی صفحه پایینی خازن در جهتی که روی شکل نشان داده شده است در مدار به حرکت

درمی‌آیند تا بارمثبت‌صفحه بالایی را خنثی کنند. این جریان الکترونی درداخل وخارج سیم‌پیچ یك میدان مغناطیسی ایجاد مـی‌کند . همینکه بار مثبت صفحه بالایی خنثی شد وجریان الکترونها بسوی صفرمیل کردُ فلوی مغناطیسی نقصان می‌یابد و تغییر فلو سبب می‌شود که جریان الکترونهای آزاد صفحه پایینی در



شکل ۱۶-۳- طرح ساده یك مدار نوسان‌کننده LC.

همان جهت ادامه یابد تا اینکه میدان مغناطیسی ازبین برود و جریان قطع شود. دراین موقع خازن مجدداً باردار می‌شود ولی صفحه بالایی بار منفی و صفحه پایینی بارمثبت پیدا می‌کند ودوباره تخلیه الکتریکی درخلاف جهت شروع می‌شود، بهمین‌ترتیب حرکت الکترونها متوالیاً تغییر جهت می‌یابد تا انرژی آنها مستهلك شود.

بابیان دیگر، نوسان الکتریکی درچنین‌مداری متضمن انتقال انرژی ازخازن بهسیم پیچ، یا ازمیدان الکتریکی بهمیدان مغناطیسی وبرعکس است. مثلاً اگر درمبدأ زمان همه انرژی درمیدان الکتریکی متمرکز باشد دربع پریود بعدخازن تخلیه شده وتقریباً تمام انرژی‌آن درمیدان مغناطیسی سیم‌پیچ متمرکزمی گردد و.... ضمناً مقداری‌ازاین انرژی درمقاومت‌الکتریکی مدارتلف می‌شود و انرژی میدانها بهتدریج کاهش می‌یابد .

حرکت نوسانی‌الکترونها درمدارنوسان‌کننده را می‌توان شبیه به حرکت نوسانی جرم m متصل بهیك فنردانست که‌آن را ازحالت تعادل خارج ورها



شکل ۱۶-۴- عمل یك فنر مرتعش مانند عمل یك مدار نوسان کننده الکتریکی است.

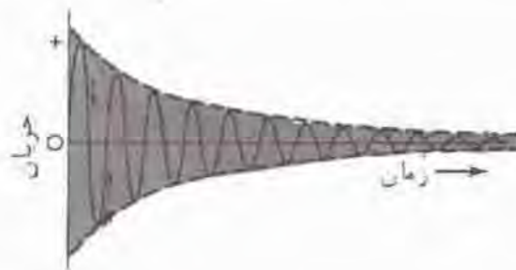
سازیم (شکل ۱۶-۴).

وقتی‌که فنر را به یك طرف می‌کشیم در آن مقداری انرژی پتانسیل ذخیره می‌شود وهمین انرژی است‌که فنررا بهنوسان درمی‌آورد ولی دراثراصطکاك دامنه نوسان رفته‌رفته کم می‌شود تااینکه فنرازحرکت بازایستد. درمدارنوسان‌کننده الکتریکی هم مقاومت الکتریکی باعث اتلاف انرژی و کاهش شدت‌جریان خواهد شد. شکل ۱۶-۵ نمودارشدت جریان دریك مدارنوسانی است. این قبیل نوسانات را «نوسانات میرا»می‌نامند وهرچه مقاومت مدار بیشترباشد میرائی نوسانات بیشتر است، بطوری‌که شدت جریان پس‌از چند نوسان صفرخواهد شد.

اگرمقاومت مدار کم باشد، میرائی نوسانات

کم و کاهش دامنه آنها ناچیزاست ونوسانات تامدت بیشتری می‌توانند ادامه یابند. در حالتی که مقاومت مدارناچیز باشد تواتر نوسانات از رابطه زیرحساب می‌شود:

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (۴-۱۶)$$



شکل ۱۶-هـ نمودار نوسانات میرا در یك مدار نوسان‌کننده الکتریکی.

مثال - اگر در یك مدار نوسان کننده LC ظرفیت خازن $0{,}01\mu F$ وضریب خود القایی سیم پیچ $1{,}0\mu H$ باشد تواتر نوسانات در این مدار چقدر است؟

داریم:

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=$$

$$=\frac{1}{2\times 3{,}14\times\sqrt{1\times 10^{-6}H\times 1\times 10^{-8}F}}$$

$$\approx 1592000\,Hz=1{,}592\,MHz$$

پرسش ۱۶-۳ - می‌دانید فرکانس نوسانات جرم m متصل به‌فنر ازرابطه:

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}}$$

به‌دست می‌آید. دراین رابطه m (جرم وزنه) و k (ضریب سختی فنر) نقش کدام کمیت‌ها را دررابطه ۱۶-۴ دارند؟

تئوری ماکسول درباره امواج الکترومانیتیك

ماکسول درسال ۱۸۵۶ میلادی مقاله معروف خود را درباره تئوری امواج الکترومانیتیك انتشار داد. او در این مقاله علمی امکان وجود امواج الکترومانیتیك را مطرح کرد و اظهارداشت اگرچنین امواجی تولید شود می‌تواند با سرعت نور در فضا منتشرشود.

تئوری الکترومانیتیك از چهار اصل زیر مایه گرفته‌است که دواصل اول آن ازکارهای اورستد وآمپر وهانری وفارادی نتیجه‌گرفته شده ودوتای آخرتعمیم دواصل اول است:

۱- جریان الکتریکی در یك هادی میدان مغناطیسی تولید می‌کند که خطوط میدان اطراف هادی دور می‌زنند.

۲- حرکت هادی در یك میدان مغناطیسی که منجر بـه قطع خطوط میدان مغناطیسی شود جریان الکتریکی درآن القا می‌کند.

۳- تغییر میدان الکتریکی درفضا سبب ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود.

۴- تغییر میدان مغناطیسی در فضا سبب ایجاد میدان الکتریکی می‌شود.

سابقاً تصورمی‌کردند که فقط عبورجریان‌ازیك هادی میدان‌مغناطیسی تولید می‌کند. ماکسول‌پیشگویی کرد که میدان مغناطیسی در هادیها و درعایقها وحتی درفضای تهی ازماده هم دراثر تغییر میدان الکتریکی به‌وجود می‌آید.

در سال ۱۸۶۵ میلادی ماکسول تئوری الکترومانیتیك خود را بصورت معادلات ریاضی که روابط میان میدانهای الکتریکی ومغناطیسی را آشکار می‌سازند عرضه کرد. این معادلات درهر لحظه ودرهر نقطه ارتباط دوبردار $\vec{E}$ و $\vec{B}$ نمایش دو میدان الکتریکی ومغناطیسی را مشخص می کنند و با محاسبه نتیجه گرفت که این دومیدان با هم با سرعت نوردر محیط فراگیرنده منتشر میشوند.

ماکسول با محاسبه نشان داد که دو بردار $\vec{E}$ و $\vec{B}$ (چنانکه درصفحات بعدخواهیم دید) درهرلحظه ودرهرنقطه عمود بریکدیگروهمچنین عمود برراستای انتشار موجند، بنابراین‌مانند امواج نورعرضی هستند و چون سرعت انتشار آنها برابر سرعت نور است پس نور هم قاعدتاً باید ازجنس‌امواج‌الکترومانیتیك باشد.

علاوه براین ماکسول پیشگوبی کردکه ممکن است امواج الکترومانیتیك در یك طیف گسترده با طول موجهای مختلف وجودداشته باشد، ولی عمرش کفاف نداد تا نتایج تجربی پیشگوئیهای خود را ببیند[1]، کشف واقعی‌امواج الکترومانیتیك ده‌سال‌پس ازمرگ وی توسط هرتز صورت گرفت.

پس از کشف امواج الکترومانیتیك، تئوری ماکسول موفقیت خارق‌العاده‌ای پیدا کرد و این موفقیت دردومسیر عملی وتئوری جریان یافت.

در عمل راهنمای تعداد زیادی از پیشرفتهای صنعتی جدید مانند رادیو وتلویزیون شد و درتئوری راهنمای بررسی وتوجیه بسیاری ازپدیده‌ها گردید.

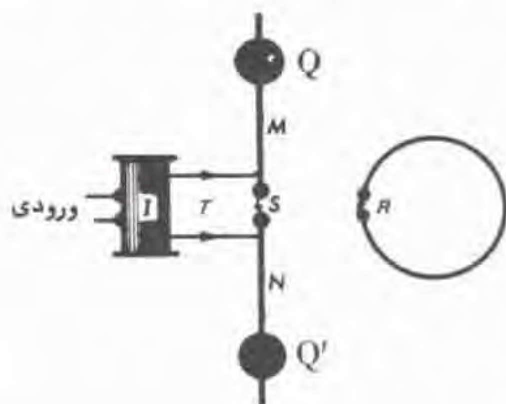
پرسش ۱۶-۴ -آیا تئوری ماکسول قادراست همه پدیده‌های مربوط به حرکت اجسام باردار به ویژه ذرات درون اتم را توجیه کند؟

آزمایش‌های هرتز ـ امواج هرتز

درسال ۱۸۸۸ میلادی، هرتز، دانشمند جوان آلمانی، به آزمایش‌هائی پرداخت که درجریان آنها توانست‌امواج الکترومانیتیك را تولید وآشکارسازد وعلاوه برآن بعضی ازخواص مهم این‌امواج مانند: انعکاس، انکسار وتداخل را نشان دهد.

شکل ۱۶-۶ یکی از آزمایش‌های هرتز را نشان می‌دهد که درآن فرستنده وگیرنده امواج دیده می‌شود.

دستگاه فرستنده هرتز ازدومیله فلزی مستقیم M و N تشکیل شده که به‌یك سرهرکدام یك کره بزرگ و به سردیگرهرکدام یك کره کوچك نصب شده‌است.



شکل ۱۶-۶- طرح ساده وسایلی که هرتز او این امواج رادیوئی را با آنها تولید و آشکارکرد.

۱ـ ماکسول در سال ۱۸۷۹ میلادی در سن ۴۸ سالگی درگذشت.

اگراین دومیله به‌ثانویه بوبین القای I وصل‌شود در دهانه S جرقه تولید شده و یك جریان نوسانی بین M و N برقرار می‌شود. علت ایجاد جریان‌نوسانی این است که مجموع دو کره و میله مانند یك مدار نوسان‌کننده الکتریکی‌است، کره‌های Q و Q′ مانند صفحات خازن ومیله‌های M و N مشابه اندوکتانس عمل می‌کنند.

گیرنده هرتز از یك حلقه ساده با شکاف R، مخصوص جرقه زدن تشکیل شده‌است. هرتز بااستفاده ازاین فرستنده و گیرنده ساده خود توانست علائم الکتریکی (رادیوئی) را بفاصله چندصدمتری ارسال ودریافت کند. اوضمن‌آزمایش‌های جالب‌خود متوجه شدکه امواج ارسال شده ازفرستنده دراثر برخورد با صفحات بزرگ فلزی منعکس می‌شوند و اگر امواج در امتداد عمود برصفحه فلزی ارسال شوند پس ازبرخورد بهمانع منعکس شده وبا امواج تابش تداخل‌کرده وتولیدگره وشکم می‌کنند.

درآزمایش اخیر(ایجاد موج‌ساکن) هرتزمحل شکم‌ها را باحلقه‌گیرنده مشخص‌کرد، زیرا وقتی‌حلقه درمحل شکم قرارمی‌گرفت تولید جرقه می‌شد و در غیراینصورت درشکاف R جرقه‌ای تولید نمیگردید.

هرتز سرعت انتشار این امواج را اندازه گرفت و دریافت همان است که ماکسول پیشگویی کرده است: یعنی سرعت نور.

در آزمایشهای بعدی خود، هرتز نشان‌دادکه تابش الکترومانیتیك از بوبین القا تمام خواص‌عادی امواج نور را دارد یعنی:

هنگام بازتابش از روی اجسام جامد صیقلی زاویه تابش برابر زاویه انعکاس است.

پس از بازتابش از روی آینه مقعر ممکن است، درکانون آینه متمرکز شوند.

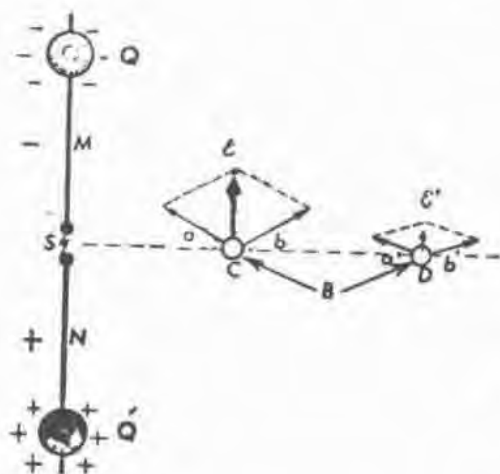
هنگام عبور از یك شکاف تفرق می‌یابند.

تمام آثار تداخل دراین امواج دیده می‌شود.

همچنین این امواج توسط منشورهایی که از شیشه، چوب، پلاستیك، پارافین‌ومواد نارسانای دیگر ساخته شده‌اند شکست می‌یابند.

چگونگی تولید و انتشار امواج الکترومانیتیك

مدار نوسان‌کننده هرتز را مطابق شکل۱۶-۷ درنظربگیرید وفرض‌کنید میله‌های M وN وکره‌های Q و Q′ قبلا باردار شده‌اند. بطوری که Q دارای بار منفی و Q′ دارای بار مثبت است. این دوکرهٔ باردار درفضای‌اطراف خود میدان الکتریکی خواهند داشت که می‌توان اثر آن را بر روی بار مثبت آزمون در نقاطی مانند C و D مشاهده و محاسبه کرد.



شکل ۱۶-۷- نوسان‌کننده هرتز.

اگر بارآزمون در نقطه C، روی عمودمنصف خط QQ' قرارگیرد نیروهای $\vec{a}$ و $\vec{b}$ با هم مساوی هستند و برآیند آن‌ها برابر E می‌باشد . E معرف شدت میدان الکتریکی در نقطه C است.

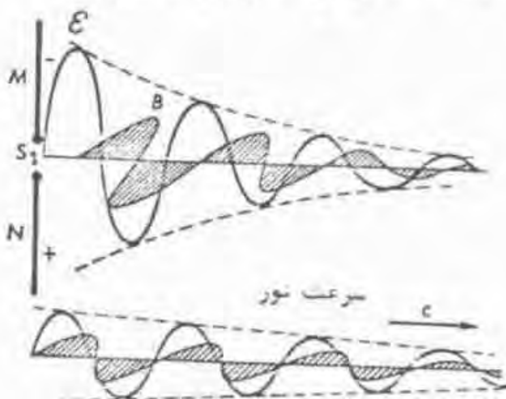
اگر شدت میدان را در نقطه D حساب کنیم، ملاحظه می‌شود که اندازه آن کمتر از شدت میدان در نقطه C می‌باشد و بعبارت دیگر هر اندازه از میله‌های M و N دورتر شویم شدت میدان ضعیف‌تر خواهد شد.

وقتی‌دردها نه S جرقه‌زده شود،نوسان‌الکتریکی بین دوکره Q و Q' شروع‌می‌شود، درنیم‌پریود بعد الکترون‌ها از فاصله S عبور می‌کنند و Q' منفی و Q مثبت می‌گردد و در نتیجه شدت‌میدان‌الکتریکی درنقاط C و D ازلحاظ‌مقدار مانند حالت اول است، ولی جهت آن تغییر می‌کند. بطورکلی در اثرنوسان الکترون‌ها بین دو کره Q و Q' میدان الکتریکی متناوب در اطراف آن‌ها ایجاد می‌شود که دامنه‌آن با دور شدن از میله M و N کاهش می‌یابد.

علاوه‌برمیدان الکتریکی، دراثرحرکت‌نوسانی الکترون‌هامیدان‌مغناطیسی متناوب B در اطراف مسیر حرکت الکترون‌ها ایجاد می‌شود که امتدادآن عمود بر صفحه‌کتاب می‌باشد. دامنه این میدان نیز با دور شدن از میله M و N کاهش می‌یابد.

طبق تئوری ماکسول، میدان‌های الکتریکی E و مغناطیسی B پس از شروع کار مدار نوسان‌کننده آناً در فواصل دور تشکیل نمی‌شود و سرعت انتشار آن‌ها برابر سرعت انتشار نور است.

میدان‌های نوسانی الکتریکی و مغناطیسی که امتدادآن‌ها بریکدیگر عمود وپریود و سرعت انتشار آن‌ها برابرمی‌باشد امواج هرتز یا امواج الکترومانیتیك را تشکیل می‌دهند (شکل ۱۶–۸).



شکل ۱۶–۸- امواج الکترومانیتیك که نوسان‌کننده هرتز منتشر می‌کند.

اگر در فاصله S یك‌سری جرقه بطور متوالی ایجاد شود، هر جرقه یك‌دسته نوسان میرا در MN ایجاد می‌کند، که این نوسان بنوبه خود یك موج الکترومانیتیکی میرا بفضا می‌فرستد(شکل ۱۶–۹).

چنانچه یك هادی که دارای بار الکتریکی مثبت و منفی می‌باشد در مسیر این امواج قرارگیرد، بارها دراثر نیروی وارد از امواج شروع به نوسان می‌کنند. اگر هادی مورد نظر مدار نوسان کننده‌ای باشد که فرکانس طبیعی آن با فرکانس امواج یکی باشد تشدید حاصل می‌شود و الکترون‌هادر مدار شروع به نوسان می‌کنند (نظیر این وضع در حلقه هرتز پیش می‌آید و درشکاف R جرقه می‌زند).



شکل ۱۶–۹- امواج الکترومانیتیکی میرا که بوسیله نوسان‌کننده هرتز منتشر می‌شود.

بدیهی‌است با تنظیم عرض شکاف R می‌توان حالت تشدید را به‌وجود آورد.

پرسش ۱۶-۵- در شکل ۱۶-۷ ، وقتی مثلاً الکترونها از کره بالایی به‌طرف کره پائینی می‌روند (یعنی جهت‌جریان مثبت رو به بالا است) با استفاده ازدستور دست‌راست بگویید که جهت میدان‌مغناطیسی در نقاط C و D چیست؟

پرسش ۱۶-۶- چرا با زدن جرجرقه درشکاف S یك دسته نوسان میرا تولید می‌شود؟

دامنه کاربرد امواج الکترومانیتیك

بوبین القای هرتز امواج الکترومانیتیك را با طول موجی در حدود یك‌متر ایجاد می‌کرد که تقریباً یك میلیون برابر طول موج نور مرئی است.

می‌دانیم طیف امـواج الکترومانیتیك بسیار گسترده است و ردیف فرکانسها در این طیف از یك هرتز تا 10^{25} هرتز (مربوط بـه طول موجهای از 10^{8} متر تـا 10^{-17} متر) شناخته شده و تعدادی از این‌فرکانسهادرعمل به‌کار رفته است. مثلاً گرما، نور، امواج رادیو، پرتوهای ایکس و .... نامهایی هستند که به این تابشها در نواحی مختلف طیف‌الکترو- مانیتیك داده شده است.

در هر یك از نواحی این طیف ، تـابش الکترومانیتیك بـه روش خاصی صورت می‌گیرد و آشکار می‌شود. مثلاً نور مستقیماً به وسیله اثرش بر روی پرده شبکیه چشم احساس می‌شود ولی برای آشکار ساختن امواج رادیـویی وسایل الکترونیکی لازم است . بعضی از نـواحی طیف همدیگر را می‌پوشانند و صفات مشترکی دارند مانند قسمتی از پرتوهای فوق بنفش و پرتوهای ایکس، و نامگذاری آنها بستگی به‌این داردکه چگونه تولید می‌شوند.

تمام امواج در طیف الکترومانیتیك ، گرچه تولید وآشکارسازیشان متفاوت است ولی رفتارشان براساس پیشگویی تئوری ماکسول است:

تمام‌آنها درخلاً با یك‌سرعت منتشر می‌شوند، یعنی با سرعت نور، همه حامل انرژی هستند ، وقتی که جذب می‌شوندجذب‌کننده‌گرم می‌شود.... تابش الکترومانیتیك با هر فرکانسی‌که باشد، فقط هنگامی صورت می‌گیرد کـه انرژی به منبع تابش آن داده شود. اکنون به‌خوبی‌آشکار است‌که تابش الکترو- مانیتیك ، هما نطور که فارادی‌بیان‌کرده‌است از شتاب گرفتن بارهای الکتریکی به روشهای مختلف‌صورت می‌گیرد. مثلاً گرم کردن ماده، انرژی ارتعاشی‌ذرات باردار را بالا می‌برد و بـه آنها شتاب لازم برای تابش الکترومانیتیك می‌دهد. همچنین نوسان‌بارهای الکتریکی (الکترونها) در یك هادی (آنتن) سبب می‌شودکه مقداری از انرژی که به آنتن برای انجام این‌کار داده می‌شود به صورت امواج الکترومانیتیك به‌اطراف تابش شود.

کارهای ماکسول و هرتز، چنانکه گفتیم‌سیمای علمی جدیدی از جهان هستی به روی انسان‌گشود و زمینه شکوفائی سریع تکنولوژی نوینی مانند رادیو، تلویزیون، رادار وغیره را فراهم‌ساخت. اینك نظری کوتاه بـه نتایج غیر مستقیم این پیشرفت علمی می‌اندازیم.

امواج رادیویی- امواج الکترومانیتیك که فرکانس آنها از 10^{4} تا 10^{7} هرتز است به خوبی از روی طبقات بارداری که در بالای آتمسفر زمین

وجود داردمنعکس می‌شوند. این کیفیت امکان‌می‌دهد که امواج رادیویی را که فرکانسشان در این ردیف است در فواصل دور از منبع تولیدشان آشکار سازند.

امواج رادیویی دارای‌طول موجی بین 10^{-1}متر و 10^{3} متر است. این امواج به‌آسانی در اطراف مانعهای کوچك مانند درختها و ساختمانها که درمسیر آنها قراردارد تفرق حاصل‌می‌کنندولی تپه‌های بزرگ و کوهها مانع نفوذ آنها می‌شوند و به‌اصطلاح سایه ایجاد می‌کنند.

برای اینکه علامات فرستنده‌های مختلف در گیرنده روی هم نیفتند لازم است کـه طول موج فرستنده‌هـا کاملاً محدود شود، برای این منظور، اتحادیه مخابرات بین‌المللی (ITU)[1]، انتشارات رادیویی وسایرمخابرات بین‌المللی را کنترل‌می‌کند. علاوه براین ساعت ارسال یا قدرت فرستنده به‌ویژه جهت ارسال محدود می‌شود.

امواج‌تلویزیون‌ورادار- تلویزیون و فرستنده‌های FM(یعنی فرستنده‌هائی کـه علامت خبر بـه صورت تغییراتی در فرکانس موج الکترومانیتیك حاصل از آنها در می‌آید) با فرکانسهایی در حدود 10^{8} هرتز کار می‌کنند.

امواج بااین‌فرکانسها ازرویه طبقات باردار بالای جو زمین منعکس نمی‌شوند، بعلاوه این امواج‌تقریباً به‌خط مستقیم منتشر شده و از انحناء کره زمین تبعیت نمی‌کنند. بنابراین برای انتقال خبر (اعم از تصویر و صدا و علامات دیگر) بین دونقطه‌که بیش از ۱۰۰ کیلومتر فاصله دارند دستگاههای تقویت (رله) حتی در غیاب کوهها و تپه‌ها لازم است. ولی وسیله‌ارتباط بین زمین و ماه و سیارات دیگر می‌توانند باشند.

امروزه خبر را بـه وسیله ماهواره‌ها تقویت کرده از یك محل به محل دور دیگر، یا از یك قاره به قاره دیگر می‌فرستند.

چون طول موج این امواج در حدود متر و کمتر از آن است دراطراف اشیایی‌که ابعادآنها در حدود چند متر است، مانند اتومبیلها، کشتی‌ها، هواپیماها، تفرق حاصل نمی‌کنند و از روی آنها منعکس می‌شوند. بنابراین علامات موجی بـا طول موج از یك‌متر تا یك میلیمتر برای ردیابی از چنین اشیایی به‌کار می‌روند.

علامت‌موجی ممکن است به‌صورت تك‌موجها (پالسها) ارسال شود. در این صورت زمان بین‌لحظهٔ گسیل پالس و لحظه دریافت بازتابش‌آن فاصله‌شیء منعکس‌کننده را از دستگاه فرستنده مشخص می‌کند. این تکنیك بـا علامت اختصاری RADAR[2] (رادار) به معنای «ردیابی و مسافت‌یابی با امواج رادیویی» مشخص می‌شود. به کمك دریافت انعکاس امواجی‌که فرستاده می‌شودمی‌توان‌هم‌فاصله وهم‌جهت حرکت شیء را مشخص کرد. (امواج زیـر قرمز و بـالای بنفش در بخش نور و پرتوهـای ایکس در کتاب فیزیك سال سوم شرح داده شده است و از تکرار آنها خودداری می‌شود).

پرسش ۱۶-۷- هنگامی‌که هواپیمائی از بالای خانه شما می‌گذرد و تلویزیون شماروشن است‌ممکن

1_ International Telecommunation Union

2_ Radio Detecting and Ranging

است آشفتگی محسوسی در تصویر تلویزیون حاصل شود آیا می‌توانید علت را بیان‌کنید؟

به این پرسشها پاسخ دهید

۱ـ منظور از مدار نوسان‌کننده چیست ؟ یك مدار نوسان کننده ساده از چه اجزاء اصلی تشکیل شده است؟

۲ـ فرکانس نوسانات الکتریکی در یك مدار به چه عواملی بستگی دارد؟

۳ـ منظور از تشدید الکتریکی چیست؟ تحت چه شرایطی تشدید حاصل می‌شود؟

۴ـ امواج الکترومانیتیك چیست و با چه سرعتی منتشر می‌شود؟

۵ـ تعریف نوسانات میرا چیست؟ چگونه ممکن است میرائی نوسانات‌کم شود؟

۶ـ براساس فرضیه ماکسول ، وقتی یك میدان الکتریکی متغیر موجود باشد چه چیز تولید می‌شود؟

۷ـ چهار اصل پایه تئوری الکترومانیتیك را بیان‌کنید.

۸ـ ماکسول با محاسبه سرعت امواج الکترومانیتیك چه چیز را پیشگویی‌کرد؟

۹ـ ترکیب ماکسول چیست؟

۱۰ـ کدام پیشگوئیهای ماکسول توسط هرتز به تحقق پیوست؟

۱۱ـ چه چیز را هرتز به عنوان دتکتور امواج الکترومانیتیك به‌کاربرد؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱ـ یك‌مدار نوسان‌کننده از یك خازن بظرفیت $۶/۰\mu F$ ویك بوبین باضریب خودالقائی $۶/۰\mu H$ تشکیل شده است، فرکانس نوسانات این مدار را حساب کنید.

۲ـ اگر بخواهیم یك مدار نوسان کننده با فرکانس $۵ \times ۱۰^{۴} Hz$ تشکیل دهیم و ضریب خودالقائی بوبین $۴/۵۰\mu H$ باشد ظرفیت خازن لازم چقدر است؟

۳ـ در یك مدار نوسان‌کننده ظرفیت خازن $۰/۲۵۰\mu F$ است، اگر فرکانس مدار یك مگا هرتز باشد، ضریب خودالقائی بوبین را حساب‌کنید. جواب $۰/۱۰۱۳\mu H$

۴ـ مطلوبست محاسبه فرکانسهای ممکن‌کـه از ترکیب ۲ یا ۳ جزء زیر به منظور تشکیل یك مدار نوسان‌کننده حاصل می‌شود:

$$C_۱ = ۲/۰\mu F \text{ و } C_۲ = ۶/۰\mu F \text{ و } L = ۴/۰\mu H$$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۶

۱۶–۱)–چون جریان با تواتر زیاد میدان مغناطیسی متغیر شدیدی ایجاد می‌کند، هنگامی که از یك هادی می‌گذرد درون آن نیروی محرکه القایی به‌وجود می‌آید که طبق قانون لنز با عبور جریان ازداخل هادی مخالفت می‌کند وجریان فقط ازپوسته نازکی از رویه هادی می‌گذرد. این پدیده که «اثرپوست» نامیده می‌شود در جریان مستقیم دیده نمی‌شود و در جریان معمولی با تواتر ۵۰ هرتز هم فقط وقتی مشاهده می‌گردد که هادی حجیم باشد. بنابراین در موقع انتقال جریان با تواتر زیاد بوسیله یك‌هادی، برای این‌که مقاومت‌آن‌راکم کنند، به‌جای آن‌که سطح مقطع هادی را بزرگ بگیرند محیط آن را بزرگ می‌گیرند و برای این منظور از لوله یانوار فلزی عریض و نازك استفاده می‌کنند.

۱۶–۲)–بلی به‌وجود می‌آید ولی به سرعت مستهلك می‌شود.

۱۶–۳)–جرم m برای فنر مشابه اندوکتانس L برای مدار و $\frac{1}{K}$ مشابه ظرفیت Cاست.

۱۶–۴)–نه، تئوری الکترومانیتیك در توجیه و تفسیر تعدادی از پدیده‌های اتمی ناقص است این پدیده‌ها هم‌اکنون بوسیله تئوری کوانتوم الکترودینامیك قابل توجیه هستند.

۱۶–۵)–عمود برصفحه کاغذ به‌طرف داخل.

۱۶–۶)–هرچرقه مرئی در واقع مرکب از یك‌دسته جرقه‌های‌کوتاه است که به‌سرعت‌بین دوگلوله‌کوچك شکاف S ازطرفین به‌توالی هم‌جستن می‌کنند و علت میرا شدن نوسانات مصرف تدریجی انرژی در مقاومت جزئی میله‌ها و هوای یونیزه بین دو گلوله‌کوچك در شکاف است. می‌توان با تغییردادن ابعاد این‌گلوله‌ها و فاصله‌آنها ازیکدیگرفرکانس نوسان را تغییر داد.

۱۶–۷)–علت این است‌که امواج تلویزیونی‌که در فضا پخش شده‌اند پس از برخوردبه بدنه هواپیما منعکس‌شده و در وضع مناسب روی‌آنتن تلویزیون اثرمی‌گذارند و باعث اغتشاش می‌شوند.

۱۷

نیمه رساناها ـ ترانزیستور

یکی از شاخه‌های فعال و پر اهمیت علم وتکنولوژی در جهان امروز، «فیزیك حالت جامد» است . دراین شاخه از دانش فیزیك ، خواص فیزیکی‌ویژه‌ای ازجامدات ، مانند طرز آرایش اتمها درجامد، رفتار الکترونهای آزاد و وابسته در شبکه بلوری ، قابلیت رسانایی مواد جامد خالص و ناخالص و خواص مغناطیسی ومکانیکی جامدات در دماهای کم و دماهای زیاد مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

چون فیزیك حالت جامد در سالهای اخیر گسترش زیاد یافته و بسیاری از محققین و دانشمندان در این زمینه فعالیت دارند شرح همه مطالب بالا کتاب بزرگی را در برمی‌گیردکه از حدود کار و برنامه این کتاب‌خارج است. بنابراین دراین‌جافقط بمعرفی «نیمه‌رساناها»[1] که در صنعت الکترونیك و رادیو الکتریسته زیاد به کار می‌روند می‌پردازیم[2].

رساناها و نارساناها

ساختمان بلوری فلزات بسیار رسانای معمولی مانند نقره،مس، طلا وپلاتین‌چنان‌است‌که الکترونهای لایه‌های خارجی اتمهای آنهـا بین همه اتمهایشان مشترکند. این الکترونها که «الکترونهای ظرفیت» (والانس) نامیده می‌شوند آزاد بوده و می‌توانند درون رساناحرکت‌کنند و حرکت‌آنهاشبیه به‌حرکت نامنظم مولکولها در یك گاز است. ولی الکترونهای لایه‌های‌کامل داخلی وابسته به هسته اتم می‌باشند و در حرکت داخل رسانا آزاد نیستند.

درمقابل اجسام رسانای خوب، اجسام نارسانا (یاعایق) خوب قراردارند. این قبیل اجسام عملاً

۱ـ Semiconductors

۲ـ در صورت‌علاقه می‌توانید به‌کتابهای فیزیك حالت جامد، نیمه‌رساناها وترانزیستورها که به فارسی هم نوشته شده‌اند مراجعه‌کنید.

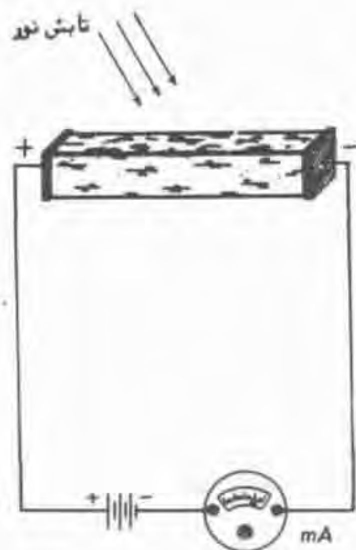
فاقد الکترون آزاد می‌باشند. نمونه آنها کوارتز ، میکا و گوگرد است که در آنها همه الکترونهای هر اتم وابسته به همان اتم هستند . مقاومت ویژه رساناهای خوب حدود 10^{-8} اهم-متر است ولی مقاومت ویژه نارساناهای خوب مانند کوارتز درحدود 10^{16} اهم-متر می‌باشد.

نیمه رساناها

در میان جامدات مواد زیـادی وجود دارند که نه رسانای خوب هستند و نـه نارسانای خوب. این مواد را « نیمه رسانا » یا « نیمه هادی » می‌نامند. در این مواد ، الکترونها فقط تحت تأثیر میدانهای الکتریکی نسبتاً قوی (مثلاً حدود چندصدهزار ولت برمتر) به‌حرکت در می‌آیند. دو نمونه مهم این‌مواد ژرمانیوم و سیلیسیوم است که در صنعت الکترونیك کاربرد فراوان دارند.

اثر نور و گرما بر نیمه رساناها ـ نور و گرما معمولاً سبب کاهش مقاومت الکتریکی نیمه رساناها می‌شوند. شکل ۱۷ـ۱ یك بلور ژرمانیوم به سطح مقطع تقریباً ۵ میلیمترمربع و به طول ۲ سانتیمتر را نشان می‌دهد که به‌وسیله سیم به باتری ومیلی‌آمپرمتر متصل است. وقتی نور بربلور ژرمانیوم بتابد شدت جریان درمدار افزایش یافته ونشان می‌دهد که مقاومت الکتریکی بلور در اثر تابش نور کاهش می‌یابد.

این عکس‌العمل بلور نیمه‌رسانا در مقابل تابش نور « هدایت در اثر نور »[1] نامیده می‌شود و پس از قطع نور آناً قطع می‌گردد.



شکل ۱۷-۱- یك مدار ساده برای نشان دادن «هدایت در اثر نور» به‌وسیله نیمه‌رسانایی مانند ژرمانیوم یا سیلیسیوم.

اگر بلور ژرمانیوم (در شکل ۱۷ـ۱) گرم شود باز هم شدت جریان در مدار افزایش یافته و معرف کاهش مقاومت الکتریکی بلور دراثر گرما است. عکس‌العمل بلور درمقابل گرما تا وقتی که بلوردمای اولیه خود را باز نیافته است ادامه دارد.

مقاومت الکتریکی رسانـاهای فلزی ، درست برخلاف مقاومت نیمه رساناها در اثر بالا رفتن دما افزایش می‌یابد.

پرسش ۱۷-۱- می‌دانید مقاومت الکتریکی یك میله کربن در اثر افزایش دما کاهش می‌یابد آیا کربن نیمه‌رسانا است؟

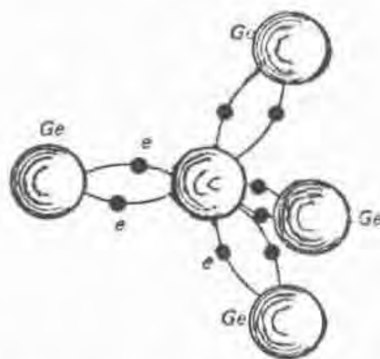
برای توضیح اثرهای گرماونور برنیمه‌رساناها

۱ـ Photoconductivity

(که در بالا به‌آنها اشاره شد) باید ساختمان شبکه بلوری نیمه رساناها را مورد نظر قراردهیم:

اتمهای سیلیسیوم و ژرمانیوم ، هر یك دارای ۴ الکترون در لایه بیرونی خود هستند که آنها را الکترون‌ظرفیت(والانس) گویندوهمین‌چهارالکترون هستندکه در پیوند شیمیائی این مواد وارد می‌شوند. ترتیب قرار گرفتن اتمها در بلورهـای ژرمانیوم و سیلیسیوم به‌صورت ساختمان چهار وجهی است و این ساختمان ، ویژه عناصر خانواده کربن (یعنی C ، Si ، Ge ، Sn و Pb) است که در جدول تناوبی عناصر در ستون کربن جای دارند . شکل ۱۷-۲ نشان می‌دهدکه هر اتم با اتم مجاور ، در یکی از الکترونهای والانس خود شریك است . این‌گونـه اشتراك الکترونها بین دو اتم مجاور را «پیوند کووالانسی» نامیده‌اند.

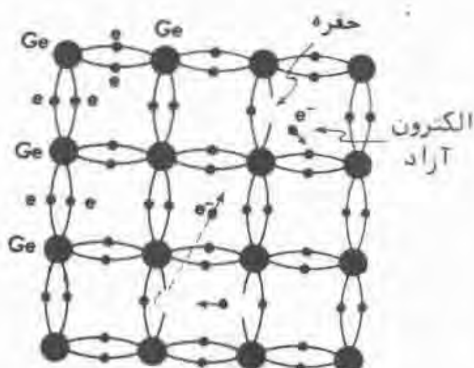
چون نمایش سه بعدی ساختمان شبکه بلوری که به شکل چهار وجهی است در روی صفحه کاغذ دشوار است راحت‌تر این است که آن را تسطیح



شکل ۱۷-۲- در بلور ژرمانیوم، هراتم در مرکز چهار وجهی با چهار اتم مجاور خود پیوند کووالانسی‌دارد.

کرده و به‌صورت یك‌شبکه مربعی مطابق شکل۱۷-۳ نشان دهیم.

در دماهای نزدیك به صفرمطلق هر الکترون با پیوند دوجانبه‌قوی به‌اتم بستگی‌دارد و بلورژرمانیوم نارسانا است. ولی در دمای معمولی ارتعاشات‌اتمها در اثر انرژی‌گرمایی کافی است که پاره‌ای از این



شکل ۱۷-۳- طرح ساده‌ای از پیوند کووالانسی اتمها دربلور ژرمانیوم. آشفتگی‌گرمایی‌باعث‌گسستن چندپیوند و آزادشدن الکترونها می‌شود.

پیوندها را بگسلد و تعدادی‌الکترون آزادگردد. این الکترونها می‌توانند درون بلور حرکت‌کنند.

وقتی الکترونی از یك اتم خارج شود محل خالی آن «حفره»[1] نامیده می‌شود. اتمی‌که‌الکترون از دست دهد یون مثبت می‌شود از این‌رو می‌تـوان گفت حفره معادل بارالکتریکی مثبت است.

وجود حفره در یك اتم می‌تواند باعث جذب یکی از الکترون‌هـای اتم مجاور گردد . بنابراین می‌توان انتقال ظاهری حفره را از یك اتم به اتم دیگر در خلاف جهت حرکت الکترون دانست.

1- Hole

حرکت الکترونها دریك نیمه‌رسانا ، حرکت نامنظم می‌باشد و با استفاده از یك باتری و ایجاد یك میدان خارجی می‌توان این حرکت نامنظم‌را به یك حرکت جهت‌دار تبدیل کرد.

اگر دو طرف یك بلور ژرمانیوم را درمحیطی که دمای آن بالاتر از صفر مطلق است به دو قطب یك باتری وصل کنیم ، الکترونهای ظرفیتی آزادشده برای پر کردن حفرهادرجهت معینی ، شروع بحرکت می‌کنند وحفره‌ها به ظاهردرجهت میدان (یعنی‌خلاف جهت حرکت الکترونها) جابه‌جا می‌شوند.

وقتی دمای نیمه‌رسانا بالا رفت انرژی درونی آن افزایش می‌یابد و در نتیجه پیوندهای مشترك موجود بین الکترونها بیشتر سست شده و گسسته می‌شود ، بعبارت دیگرحفره‌ها والکترونهای بیشتری بوجود می‌آید. افزایش حفره‌ها و الکترونها سبب افزایش شدت جریان و کاهش مقاومت نیمه رسانا می‌گردد.

با استفاده ازهمین خاصیت می‌توان یك رسانا را از یك نیمه‌رسانای خالص تشخیص داد.

جریان الکتریکی درنیمه‌رساناها ، مانندا جسام رسانا در اثر حرکت و جابجائی الکترونهای آزاد انجام می‌شود. وجود الکترون و حفره (یا زوجهای حفره-الکترون) در یك نیمه رسانای خالص مشابه یونهای مثبت و منفی در یك الکترولیت است ، به عبارت دیگر عامل انتقال جریان در الکترولیت‌ها یونهای مثبت ومنفی و درنیمه‌رساناهای خالص حفره و الکترون است.

پرسش ۱۷-۳- چگونه می‌توانید کیفیت «هدایت در اثر نور» را طبق‌آن چه درباره اثرگرما بر نیمه‌رساناها بیان شد توضیح دهید؟

نیمه رسانای نوع N و P

اگر در بلور نیمه رسانا مقدار بسیار جزئی (حدود یك درمیلیون) نـاخالصی وجود داشته باشد تعداد حفره‌هـا و الکترونها افزایش بسیار زیادی می‌یابد. برای نمونه اگر به بلور ژرمانیوم مقدار جزئی آرسنیك (As) و یا اندیم (In) اضافه شود باعث تحریك نیمه‌رسانا می‌گردد.

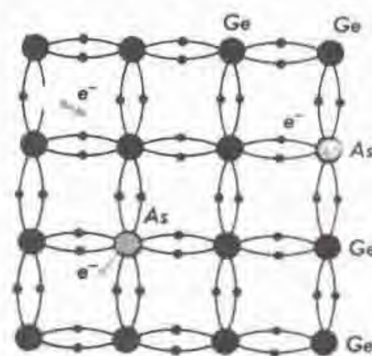
آرسنیك عنصری است که دارای پنج‌الکترون ظرفیتی می‌باشد و موقعی که یکی از اتمهای آن در مجاورت اتمهای ژرمانیوم قرارگیرد چهار الکترون آن با چهار اتم ژرمانیوم پیوندکووالانسی محکمی تشکیل می‌دهد. درصورتیکه الکترون پنجمی آن بـا نیروی بسیار کمی نگاهداری شده و با صرف‌انرژی جزئی می‌توان آن را آزاد ساخت. موقعی کـه یك الکترون از ماده خارجی نیمه رسانا آزاد شد ، این الکترون می‌تواند مانندالکترونهای‌آزاد بلور خالص حرکت‌کند. اتم‌آرسنیك‌که الکترون پنجم خود را از دست می‌دهد مانند یك یـون بی‌حرکت عمل خواهد کرد زیرا با چهار اتم مجاور ژرمانیوم نگاهداشته می‌شود.

اتمهائی مانندآرسنیك‌که الکترون آزاد ایجاد می‌کنند«دهنده» نامیده می‌شوند. ونیمه رسانائی که شامل این‌اتمها می‌باشد «نیمه هادی نوع N» است (شکل ۱۷-۴-الف) .

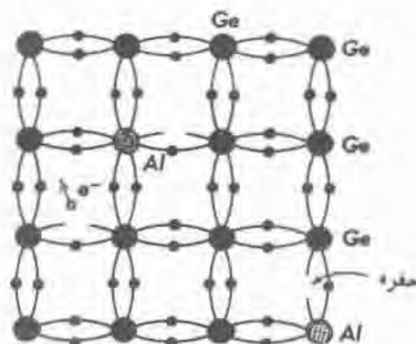
اگربه‌جای آرسنیك، برای‌ایجاد ناخالصی، از عنصری که دارای سه الکترون ظرفیتی باشد مانند آلومینیم یا اندیم و گالیم استفاده شود «نیمه هادی نوع P» بدست می‌آید (شکل ۱۷-۴-ب).

هریك ازاتمهای عنصری مانند آلومینیم با سه اتم مجاور ژرمانیوم پیوندکووالانسی تشکیل می‌دهد

وچون هر اتم بلور به‌چهار پیوند کووالانس احتیاج دارد مثل این است کــه اتم ناخالصی یك الکترون



شکل ۱۷-۴-الف ــ نیمه‌هادی نوع N که دارای ناخالصی آرسنیك می‌باشد.



شکل ۱۷-۴-ب ــ نیمه‌هادی نوع P که دارای ناخالصی آلومینیم است.

کم داشته باشد و در نتیجه جویای الکترون جدیدی است. کمبود الکترون در این نقطه حفره‌ای ایجاد می‌کند که می‌تواند باعث جذب الکترون‌های مجاور شود و این عمل بنوبت خود برای حفره‌های دیگر انجام می‌شود بطوری که می‌توان گفت حفره تحت تأثیر انرژی درونی ، حرکت نامنظمی خواهد یافت و چنانچه اختلاف پتانسیلــی بین دو سر نیمه رسانا برقرارشود حفره ظاهراً بسمت الکترود منفی هدایت شده باعث عبورجریان می‌شود.

اتم‌هائی مانند آلومینیم کــه بر تعداد حفره‌ها می‌افزایند، «پذیرنده» ونیمه رسانایی که دارای این نوع ناخالصی می‌باشد « نیمه رسانای نوع P » نامند .

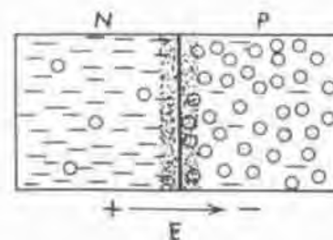
پرسش ۱۷-۳ - بار الکتریکــی حفره چقدر است ؟

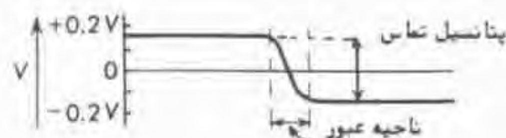
اتصال P-N یا دیود

وقتی دو نیمه رسانا ازدونوع P و N مطابق شکل ۱۷-۵ به هم اتصال داده می‌شوند مجموعه حاصل را «اتصال PN» یا «دیود[1]» می‌نامند. در ناحیه تماس، توده‌ای از الکترونهای آزاد بلور N ، ازمرزتماس دوبلورنفوذ کرده به‌طرف بلور P می‌روند (مانند ملکولهای گاز که به‌درون ماده‌سفالین‌خلل‌فرج‌داری نفوذ می‌کنند).

چون‌الکترونها بلور N را ترك می‌کنند درآن یونهای مثبت به‌وجودآمده وپتانسیل‌مثبت پیدامی‌کند، ولی بلور P الکترون دریافت داشته و پتانسیل منفی پیدا می‌کند. به‌ترتیبی‌که نفوذ الکترونها به بلور P ادامه می‌یابد اختلاف پتانسیل دردوطرف سطح‌تماس زیادتــر می‌شود. الکترونهائیکه از N به P نفوذ می‌کنند سبب پرشدن حفره‌های مثبت P می‌گردند و پرشدن حفره‌ها در بلور P باعث ظاهــر شدن تعداد بیشتر حفره در N می‌شود: مثل این است‌که حفره‌ها

1_ Diode





شکل ۱۷ـجـ وقتی دو بلور N و P به هم اتصال داده می‌شود بین آنها اختلاف پتانسیل به وجود می‌آید. دایره‌های کوچك نمایش حفره‌هاست.

از P به N نفوذ می‌کنند. این عمل آن قدر ادامه می‌یابد تا این که تعادل الکتروستاتیکی بین دو بلور برقرار شود.

درحالت تعادل الکتروستاتیکی، تعداد الکترونی که از مرز تماس در دو جهت مخالف عبور می‌کنند برابر است.

اختلاف پتانسیل بین نقاط مختلف دو طرف سطح تماس، در حالت تعادل، به‌وسیله نموداری زیر شکل ۱۷ـ۵ نمایش داده شده است. یادآور می‌شویم که تغییر ناگهانی پتانسیل در ناحیه تماس به سبب وجود میدان الکتریکی شدید موجود در این ناحیه است.

پرسش ۱۷-۴- به‌نظرشما چرامیدان‌الکتریکی درناحیه تماس شدید است؟

با آنکه روشهای متعدد و پیشرفته‌ای درتهیه دیودها به کار مـی‌رود ولی باز هم درمحل تماس، جزئی ازدوماده نیمه رسانا به سبب پستی و بلندیهای میکروسکپی که درسطح تماس آنها وجود دارد، درهم فرورفته و مخلوط می‌شوند. این ناحیه مخلوط شده «ناحیه عبور[۱]» نامیده می‌شود. ضخامت ناحیه عبور دردیودهای PN معمولی درحدود 6×10^{-5} میلیمتر است و اختلاف پتانسیل، که «پتانسیل تماس» نیز نامیده می‌شود، ممکن است بسته به‌نوع مواد دونیمه رسانایی که باهم تماس دارند ازحدود کسری ازولت تا ۱ یا ۲ ولت باشد.

میدان الکتریکی دراین ناحیه (که به‌آن‌میدان نفوذ نیزمی‌گویند) با توجه به‌مقادیر عددی داده شده بالا، ممکن است به‌چند میلیون ولت برمتر برسد.

اگر دو صفحه فلزی به دوسر دیود PN لحیم کرده و آنها را به وسیله دو رشته سیم (نظیر شکل ۱۷ـ۱) به دو محل اتصال یك میلی آمپر متر وصل کنیم، مجموعه در حکم یك باتری آفتابی (یا سلول آفتابی) خواهد بودکه در اثرتابش نور برروی آن، جریان درمدار برقرارمی‌شود.

پرسش ۱۷-۵ - آیا می‌توانید بگوئید جهت جریان الکترونها دراین مدارچگونه است؟

یکسوکننده PN

وقتی می‌خواهیم یك دیود PN را به منظور عبور دادن جریان ازآن، به دوقطب یك باتری وصل کنیم دیود ممکن است به دو طریق به باتری بسته شود:

۱ـ Transition region

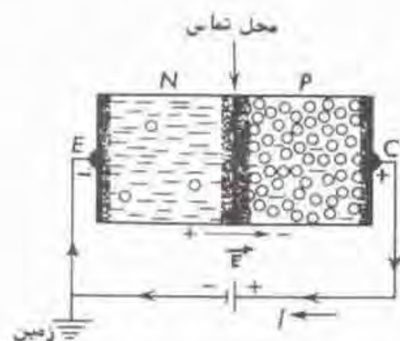
درآنجا تعدادشان زیاد است ورانده شدن الکترونها هم ازجائی که درآنجا تعدادشان نیززیاد می‌باشد. در نتیجه جریان قوی خواهیم داشت.

ب) اگر برعکس حالت قبل، بلور N مطابق شکل ۱۷ــ۷ به‌قطب مثبت باتری بسته شود، در این حالت حفره‌ها بایدازجائی رانده شوندکه فقط چند حفره وجود دارد والکترونها هم ازجائی که تعدادشان بسیارکم است وعملاً جریان ضعیفی خواهیم داشت. به‌همین جهت دیود PN برای یکسو کردن جریان متناوب به‌کارمی‌رود.

ترانزیستور

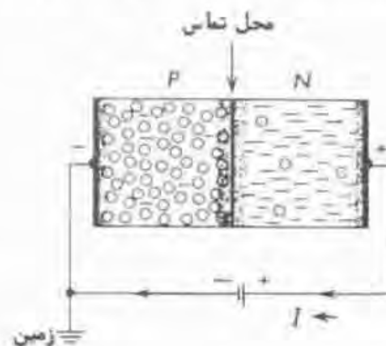
ترانزیستورازسه نیمه رسانا ساخته می‌شود که معمولاً دوتای‌آنها ازنوع N ویکی ازنوع P است که مطابق شکل ۱۷ــ۸ به‌هم متصل می‌شوند این‌نوع ترانزیستوربا علامت اختصاری نوع NPN نمایش داده می‌شود . می‌توانیم نوع PNP را نیز داشته باشیم .

درنظر بگیرید که بین دونقطه B و E اتصال‌اول ترانزیستور NPN، اختلاف پتانسیل V_{BE} وبه‌دو سراتصال دوم‌آن‌اختلاف پتانسیل V_{CB} (مطابق آنچه درشکل نمایش داده شده است) برقرارمی‌شود. چون میدان الکتریکی در اتصال اول چندان قوی نیست الکترونها از «گسیل دهنده[۱]» E به سمت راست حرکت می‌کنند و حفره‌های مثبت از «قاعده[۲]» B به طرف چپ، ویك ولتاژ کوچك V_{BC} کافی است تا جریان نسبتاً قابل ملاحظه‌ای دراین اتصال ایجادکند. اگرارتباط الکتریکی‌اتصال دوم، همانطورکه درشکل



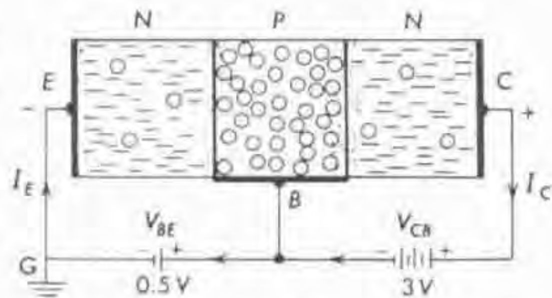
شکل ۱۷ـ۶ـ شرح ساده‌ای از اتصال يك دیود PN به باتری: بلور P به قطب مثبت باتری متصل و جریان از مدار می‌گذرد.

الف) اگربلور P مطابق شکل۱۷ــ۶ به‌قطب مثبت باتری بسته شود، الکترونها از N به طرف P رانده می‌شوند و حفره‌ها ظاهراً از P به‌طرف N. و هردوکمك به‌ایجاد جریان درمدار می‌کنند. به عبارت دیگر، رانده شدن حفره‌ها از جائی آغاز می‌شودکه



شکل ۱۷ـ۷ـ اتصال دیود PN به باتری درحالتیکه‌بلور N به قطب مثبت باتری متصل است و جریان ضعیفی از مدار می‌گذرد.

۱ـ Emitter ۲ـ Base



شکل ۱۷-۸- طرح ساده‌ای از یك ترانزیستور NPN یا تریود که ارتباط الکتریکی مستقیم و معکوس را نشان می‌دهد.

دیده می‌شود، معکوس باشد (یعنی بلور N به قطب مثبت باتری بسته شود) الکترونها سعی می‌کنند از بلور P به‌سمت راست حرکت نمایند و حفره‌ها از «کلکتور C»[1] به‌طرف چپ. چون تعداد حفره‌ها در کلکتور C بسیار کم و تعداد الکترونها در قاعده B نیز کم است جریان دراین اتصال، حتی به‌ازای ولتاژ قابل توجه V_{CB} قابل ملاحظه نیست.

با عمل مسدود کردن جریان دراتصال دوم، به طریقی که گفته شد، جریان زیادی بین گسیل دهنده E وقاعده B برقرار می‌شود. یعنی جریان دراتصال اول تقویت می‌گردد. ترانزیستورها علاوه بر یکطرفه کردن جریان برای تقویت جریانهای ضعیف به‌کار می‌روند ودرصنعت الکترونیك و رادیوالکتریسیته کاربرد زیاد دارند[2].

به این پرسشها پاسخ دهید

۱- نیمه‌رسانا چیست، چندنوع نیمه‌رسانا وجود دارد، نیمه رسانای نوع N و نوع P چیست؟

۲- منظور از اتصال PN چیست؟

۳- باتری آفتابی چیست؟ اساس کارآن چگونه است؟

۴- مداری رسم کنید که درآن یك اتصال PN توسط دورشتهٔ سیم به‌یك میلی‌آمپرمترمتصل شده باشد و جهت حرکت الکترونها را در این مدار مشخص کنید.

۵- یکسوکننده PN چگونه عمل می‌کند؟ با رسم شکل توضیح دهید.

۶- منظور از نیمه رسانای دهنده وپذیرنده چیست و چه عاملی باعث می‌شودکه نیمه‌رسانا پذیرنده باشد؟

۷- افزایش دما در رسانائی اجسام رسانا و نیمه رسانا چه تأثیری دارد؟

۸- ترانزیستور چیست؟

۹- چرا ترانزیستور با سرعت توانست در وسایل الکترونیکی وارد شود؟

۱۰- ترانزیستور PNP را با ترانزیستور NPN مقایسه کنید.

---

1 _ Collector

۲- بحث درباره کاربرد ترانزیستورها از حدود برنامه این کتاب خارج است و در صورت علاقه می‌توانید به کتب مربوط مراجعه کنید.

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۷

۱۷–۱)-بلی ، کربن و غیرفلزات خانواده کربن که ژرمانیوم و سیلیسیوم نیز جزو آنها می‌باشند همه نیمه‌رسانا هستند.

۱۷–۲)-وقتی نور بریك بلور نیمه رسانا می‌تابد (شکل ۱۷–۱) فوتونهای نور در چند لایه اتمی جذب می‌شوند. انرژی جذب شده باعث گسستن پاره‌ای از پیوندهـای الکترونی شده و حفره ایجاد می‌گردد. این رویداد را «فتویونیزاسیون» گویند. اختلاف پتانسیل بین دو سر بلور سبب حرکت الکترونها دریك جهت وحرکت ظاهری حفره‌ها در جهت مخالف می‌شود وحرکت این بارهای الکتریکی ایجاد جریان می‌کند . همین‌که تابش نور قطع شد ، الکترونها به طور تصادفی در حفره‌ها به دام می‌افتند و بلور حالت اولیه خود را باز می‌یابد.

۱۷–۳)-چون هر حفره محل کمبود یك الکترون است می‌توان گفت کـه بار آن معادل بار یك الکترون ولی مثبت می‌باشد (یعنی $+e$).

۱۷–۴)-چون ضخامت ناحیه تماس بسیار کم است شدت میدان الکتریکی که از رابطه $E=\frac{V}{d}$ حساب می‌شود (نظر به بسیار کوچك بودن d) بسیار زیاد است.

۱۷–۵)-نور توسط بلورها جذب شده و الکترونها آزاد وحفره‌ها ایجاد می‌شوند. به‌علت وجود میدان الکتریکی شدید در ناحیه عبور ، الکترونها در داخل بلورها از P به N و حفره‌ها (در جهت میدان) از N به P حرکت می‌کنند و در مدار جریانی برقرار می‌شود کـه به آسانی با میلی آمپرمتر قابل اندازه‌گیری است.

۱۸

مدلهای اتمی ـ ساختمان هسته اتم

از آغاز قرن بیستم میلادی تاکنون فیزیك جدید ، کـه اصولاً به‌بحث درباره اتمها وملکولها وساختمان ماده وخواص آنهامی‌پردازد، توسعه خارق‌العاده یافته است ، بسیاری از دانشمندان در سراسر جهان توجه خودرا به‌این رشته از دانش جدید معطوف کرده‌اند وکشفیات و نظریات آنان تأثیر زیادی درپیشرفت علم وصنعت بشر داشته وخواهد داشت.

چون بحث دربـاره «ساختمان اتـم» موضوع نسبتاً جدیدی است، منطقی به‌نظر می‌رسد که مطلب را به‌همان ترتیبی که مشاهدات و کشفیات صورت گرفته و تئوریها یکی پس از دیگری وضـع و کامل شده‌اند تعقیب کنیم. ولی بحث درباره جزئیات این‌مطالب، طولانی و خارج ازحدودکار وبرنامه این‌کتاب است. به‌همین جهت دراین فصل شما را در مسیر نظریه‌ها و کشفیات مهمی که منجربه اطلاعات کنونی بشر درباره ساختمان اتـم و نتایج حاصل از آن شده است خواهیم گذاشت .

درکتاب فیزیك سال‌سوم دوره‌نظری، شما پاره‌ای از مشاهدات وآزمایشهایی‌راکه منجربه کشف‌الکترون شدآموختید. همچنین با نظریه ساختمان منظومه‌ای شکل اتم که پایه‌گذاران‌آن رادرفورد وبور هستند آشنا شدید. مراجعه به آن مطالب توصیه مـی‌شود . دراین‌جا نخست نظریات دانشمندان درباره مدلهای اتمی را با تفصیل بیشتر خواهید آموخت، سپس اندکی هم با ساختمان هسته اتم و واکنشهای هسته‌ای آشنا خواهید شد.

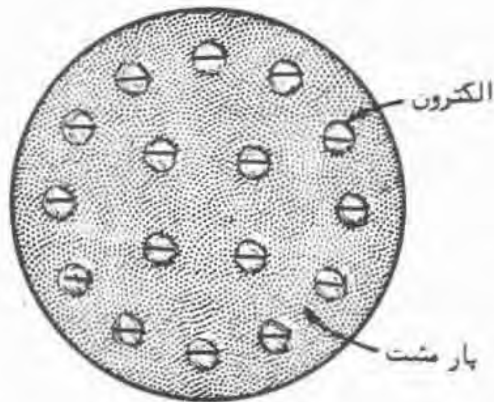
مدل اتمی تامسون

تامسون فیزیکدان انگلیسی، بین سالهای ۱۸۹۵ و ۱۹۰۰ میلادی، ضمن مطالعه پرتوهای کاتودیك[1] پس از یك رشته آزمایش پی برد که ذرات تشکیل‌دهنده پرتوهای کاتودیك (یعنی الکترونها) یکی از اجزاء همهٔ مواد بوده و به مراتب از اتم هیدروژن کوچکترند. تامسون ازمطالعات خود نتیجه گرفت که اتم کوچکترین جزء ماده نیست بلکه الکترون یکی از اجزاء اتم است و حتی ممکن است یکی از اجزاء بنیادی ساختمان اتم باشد (و امروزه ما می‌دانیم که چنین است).

علاوه بر این تامسون، یك مدل اتمی پیشنهاد کرد که درآن طرز قرار گرفتن الکترونها دراتمهای عناصرمختلف طرح ریزی شده بود.

دراین‌مدل بارمثبت اتم بطوریکنواخت درون کـره‌ای به قطر تقریبی 10^{-10} متر پخش شده و الکترونها روی لایه‌های مختلف، مطابق شکل ۱۸-۱ قرار گرفته‌اند. تامسون معتقد بودکه بار مثبت اتم، الکترونها را به طرف مـرکز کره می‌کشد ولی الکترونها یکدیگر را می‌رانند و همین مسئله سبب می‌شودکه الکترونها لایه‌های کروی شکلی‌را تشکیل دهند.

با یك آزمایش جالب، مطابق شکل ۱۸-۲، می‌توان به چگونگی تشکیل این لایه‌ها پی برد: یك طشتك شیشه‌ای به قطر ۱۵ تا ۲۵ سانتیمتر انتخاب می‌کنیم ودور تا دورآن ۳۰ دورسیم‌مسی روپوش‌دار نسبتاً کلفت می‌پیچیم[2]. چند سوزن خیاطی معمولی



شکل ۱۸-۱-مدل اتمی تامسون



شکل ۱۸-۲-سوزنهای شناور در میدان مغناطیسی معرف لایه‌های الکترونی در اتم تامسون هستند.

یکسان راکه (با مالیدن قطب N یك آهن‌ربای قوی ازته سوزن بەنوك‌آن) مطابق شکل‌آهن ربا کرده‌ایم ازوسط چوب پنبه‌های کوچك (ازوسط هر چوب‌پنبه یك سوزن) می‌گذرانیم. سپس درطشتك مقداری‌آب می‌ریزیم وجریانی بەشدت ۱ یا ۲ آمپر از سیم‌پیچ عبور می‌دهیم. دراین حالت اگریکی از چوب‌پنبه‌ها را برسطح‌آب شناور سازیم بطوری که سوزن در راستای قائم باشد، چوب پنبه بەطرف مرکز طشتك که درآن جا میدان مغناطیسی شدیدتر است می‌رود. اگرچوب‌پنبه‌ها رایکی پس‌ازدیگری‌نزدیك به دیواره

۱- به‌کتاب فیزیك سال سوم نظری (بخش ۹ : ماهیت ماده - الکترونها) مراجعه کنید.

۲- می‌توانیم از سیم روپوش‌دار نمره ۱۴ که قطرآن در حدود 1/5 میلیمتر است استفاده کنیم.

طشتك برسطح آب قرار دهیم، با گرفتن وضع تقارن هندسی نسبت به یکدیگر، روی دوایر هم مرکزی جمع شده وحلقه تشکیل می‌دهند.

لازم به تذکراست که این آزمایش، نمونه یك مدل دو بعدی ازنظریه تامسون است وچوب‌پنبه‌ها که دریك صفحه (سطح آب درون طشتك) واقع هستند حلقه تشکیل می‌دهند . ولی درمدل اتمی تامسون، الکترونها روی لایه‌های کروی شکل قرار می گیرند.

پرسش ۱۸-۱ - آیا تغییر شدت جریان در سیم پیچ تأثیری در وضع این حلقه‌ها خواهد داشت؟

گفتیم که درمدل اتمی تامسون، بار مثبت‌هسته تمام فضای اتم را پر می کند. به‌عبارت دیگر، ابعاد بارمثبت، همان ابعاد اتم است که آزمایش ومحاسبه آن‌راحدود انگستروم ($10^{-10}m$) نشان می‌دهد. ولی آزمایشهای پراکندگی ذرات آلفا به‌هنگام عبور از ورقه‌های فلزی بسیار نازك ، که توسط رادرفورد و همکارانش انجام شد (و شما در کتاب فیزیك سال سوم دریك مسئله با یکی ازآنها آشنا شده‌اید) نشان می‌داد که بار مثبت اتم دارای ابعادی در حدود 10^{-15} متر است. مدل اتمی تامسون قادر نبود این پدیده پراکندگی را توجیه کند . به همین جهت رادرفورد براساس‌آزمایشهای خود مدل اتمی دیگری پیشنهاد کرد.

مدل اتمی رادرفورد

رادرفورد[1] طی سالهای ۱۹۰۹ تا ۱۹۱۱ میلادی یك‌مدل اتمی پیشنهاد کرد که درآن‌بارالکتریکی مثبت وقسمت اعظم جرم اتم درهسته کوچکی متمرکز بوده و الکترونها در فاصله دوری ازهسته (نسبت به ابعاد اتم) قراردارند.

رادرفورد به‌مطالعه پرتوهای گسیل‌شده ازمواد رادیواکتیو، به‌ویژه پرتوهای آلفا (α) علاقمند بود. می‌دانید ذرات α ، هسته اتمهای هلیوم با بار مثبت (He^{++}) هستندکه جرم آنها حدود ۷۵۰۰ برابر جرم الکترون است. رادرفورد ضمن عبور دادن دسته پرتوهای متشکل از ذرات آلفا از ورقه‌های فلزی بسیارنازك مشاهده کرد که این‌ذرات به‌اطراف‌پراکنده می‌شوند .

رادفورد درباره علت پراکندگی اظهارداشت که این پدیده ممکن است به سبب وجود نیروهای الکتروستاتیکی میان‌بارهای مثبت ذرات‌آلفا وبارهای مثبت موجود دراتمها باشد. اتمها، هم بارمثبت‌دارند وهم بارمنفی. بنابراین یك‌ذره‌آلفا وقتی ازداخل‌ماده می گذرد متحمل دو نوع نیروی جاذبه و دافعه الکتروستاتیکی می‌شود. اندازه و جهت این نیروها بستگی به‌این دارد که ذره آلفا چه اندازه به مرکز اتمهایی‌که ازمیان‌آنها می‌گذرد نزدیك شود. بدیهی است محاسبه میزان پراکندگی بستگی به مدل اتمی پیشنهاد شده دارد وباآزمایش نیزباید وفق دهد.

اتم تامسون شبیه به‌توده ابری است که درآن ذرات بسیار ریز غبارمعلق است. چنین اتمی با این کیفیت ساخت، قادر نیست به ذره‌آلفا انحرافی بیش

۱- Ernest Rutherford (۱۸۷۱-۱۹۳۱م) فیزیکدان نیوزلندی که برای کارهای علمی خود جایزه نوبل گرفت.

از چند درجه بدهد. به عبارت دیگر، مدل تامسون نمی‌تواند پیشگویی کند که یك ذره آلفا بیش از چند درجه منحرف شود. ولی آزمایش غیر از این مطلب را نشان داد (شکل ۱۸-۳- الف):

هانس گیگر[۱]، یکی از همکاران رادرفورد، ضمن مطالعه پراکنده شدن ذرات آلفا متوجه شد که تعداد ذرات پراکنده شده تحت زاویه °۱۰ و بزرگتر از °۱۰ بمراتب زیادتر از آن است که مدل تامسون پیشگویی می کند و در واقع یك ذره از تقریباً هر ۸۰۰۰ ذره تحت زاویه بزرگتر از °۹۰ پراکنده می‌شود. یعنی تعداد قابل توجهی از ذرات آلفا مستقیماً پس از برخورد با اتمهای ورقه به‌عقب برمی گردند و این کشف، غیر منتظره بود. رادرفورد، خود می نویسد:

«... من پی بردم که برگشت ذره آلفا بعقب باید نتیجه یك برخورد باشد و پس از محاسبه دریافتم که این پدیده قابل توجیه نیست مگر اینکه سیستمی درنظر گرفته شود که در آن قسمت اعظم جرم اتم و بارالکتریکی مثبت، در یك هسته کوچك متمرکز باشد. پس این اندیشه در من پدید آمد که اتم دارای هسته کوچك متراکمی است که جرم و بارالکتریکی مثبت اتم در آن متمرکز است.»

آزمایشهای مربوط به پراکندگی ذرات آلفا و تعبیر رادرفورد، اساس مفاهیم جدید ساختمان اتمها را تشکیل می‌دهد. بگذارید به این آزمایشها و نتیجه گیری رادرفورد با دقت بیشتر نگاه کنیم.

چرا از پدیده پراکندگی ذرات آلفا نتیجه گرفته شد که قسمت اعظم جرم اتم و بارمثبت آن در هسته کوچکی متمرکز است؟

یکی از توضیحات قابل قبول این است که ورقه فلز شامل مراکز جرم و بار مثبت متراکم (هسته) بوده و تراکم جرم و بارالکتریکی در این هسته‌ها خیلی بیشتر از اتم تامسون است. یك ذره مثبت آلفا که مستقیماً بطرف یکی از هسته‌ها می‌رود، دراثر نیروی دافعه الکتروستاتیکی در نزدیکی آن متوقف شده و برمی گردد، همان‌طور که یك گلوله فولادی پس از برخورد به سنگ سخت برمی گردد نه‌پس از برخورد به توده ابری شکلی مرکب ازذرات بسیار ریز گرد وغبار.

در شکل ب دو ذره آلفای A و 'A نمایش داده شده است که به‌طرف هسته N حرکت می کنند. ذره A مستقیماً به‌طرف N پیش می‌رود. چون هسته بارمثبت دارد ذره آلفا را (که‌آن هم بارمثبت دارد) دفع می کند به‌علت وجود این‌نیروی دافعه الکتریکی حرکت ذره A به تدریج کند می‌شود و درفاصله r ازهسته N متوقف شده و برمی گردد. 'A ذره‌ای‌است که مستقیماً به‌طرف هسته N نمی‌رود بلکه از کنار آن می گذرد. این ذره هم‌که توسط هسته دفع می‌شود در مسیری‌حرکت می کند که محاسبه‌آن را هذلولی نشان می‌دهد. میزان انحراف این ذره ازمسیر اولیه بازاویه φ نشان داده شده است.

پرسش ۱۸-۳ - به نظرشما، در این آزمایشها چه عواملی برمیزان انحراف ذرات آلفا ممکن است مؤثر باشند؟

رادرفورد پیشگویی کرد که بیشتر ذرات آلفا

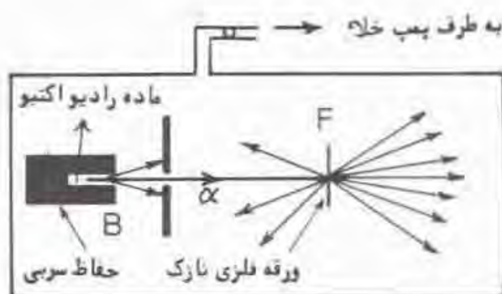
۱- Hans Geiger

تحت زوایای کوچك پراکنده می‌شوند، زیرا احتمال برخوردآنها بهسته‌های بسیار کوچك کم است. ولی تعداد قابل توجهی هم دراثر برخورد بهسته‌ها تحت زاویه‌های بزرگ پراکنده می‌شود.

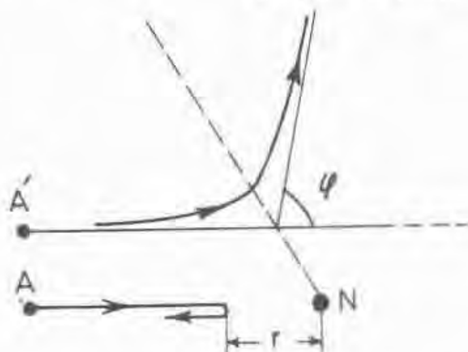
همکاران رادرفورد[1]، این پیشگویی راباسبابی که طرح آن در شکل «ج» نمایش داده شده است به مرحله آزمایش گذاشتند:

درون حفره موجود در محفظه سربی B ، ماده رادیواکتیو دهنده آلفا (رادن) قرارداده. ذرات آلفا که از سوراخ کوچك این محفظه خارج می‌شوند به هنگام عبور از ورقـه فلزی نازك F ، تحت زوایای مختلف φ منحرف می گردند. برای تعیین تعداد ذراتی که تحت هرزاویه مشخص φ منحرف می‌شوندترتیبی داده می‌شود که این ذرات بەصفحه شیشه‌ای اندوده بەلایه نازکی ازسولفید روی برخوردکنند (این صفحه درشکل به S نمایش داده شده است). هرذره آلفا که به این صفحه برخورد می کندیك «درخشندگی لحظه‌ای نقطه‌ای» (فلورسنت لحظه‌ای نقطه مـانند) پدید می‌آورد . این نقاط درخشنده را مـی‌توان با یك میکروسکوپ (که در شکل به M نمایش داده شده است) مشاهده کرد وشمرد. صفحه ومیکروسکوپ هر دو با هم روی محیط یك دایره می‌توانند جا بجا شوند .

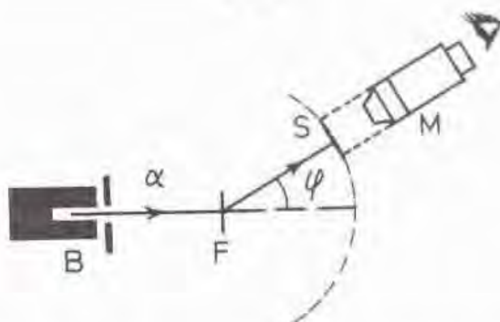
درآزمایشهای بعد، تعداد این ذرات با اسباب آشکارساز دیگری که توسط گیگر در سال ۱۹۲۸ میلادی اختراع شد (و به نام خود او «کنتور گیگر» نامیده می‌شود) به راحتی اندازه‌گیری شد. (بەشکل



الف ـ طرح ساده‌ای از پراکندگی ذرات آلفا پس از عبور از ورقه فلزی نازك



ب ـ مسیر دو ذره آلفای A و A′ که به هسته N نزدیك می‌شوند



ج ـ دستگاه برای مطالعه پراکندگی که در محفظه خالی از هوا قرار داده تاحرکت ذرات آلفا در اثر برخورد با مولکولهای هوا کند نشود.

شکل ۱۸-۳

۱ــ گیگر و مارسدن (Marsden)

۱۸ـ۴ و زیرنویس آن مراجعه کنید).

کنتور گیگر امروزه در آزمایشگاهها یکی از وسایل متداولی است که برای تعیین میزان رادیو ـ اکتیویته مواد رادیواکتیو به کار می‌رود.

رادرفورد، با توجه به نتایج حاصل از پراکندگی ذرات آلفا، ابعاد هسته و اندازه بارهای مثبت هسته‌های عناصر مورد آزمایش را حساب کرد و این بارها را برحسب مضاربی از بار الکتریکی الکترون (در آن زمان به‌وسیله میلیکان معین شده بود) مشخص نمود. تعیین بار مثبت هسته نخستین گام مهم در شناخت تعداد الکترونهای اتمها در شرایط عادی بود[1].

پرسش ۱۸-۳ ـ چگونه می‌توان از روی اندازه بار مثبت هسته تعداد الکترونها را در اتم معین کرد؟

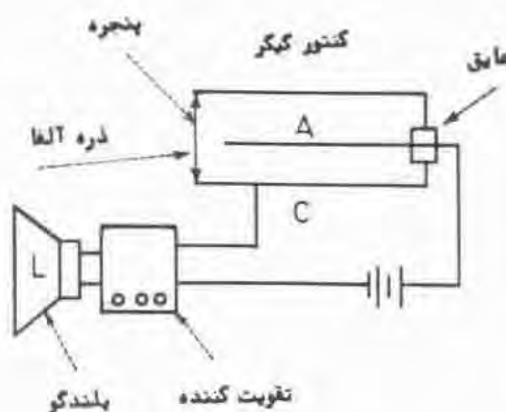
پرسش ۱۸-۴ ـ آیا با دانستن اندازه بار مثبت هسته یك اتم، می‌توان نتیجه مهمتری غیر از شناخت تعداد الکترونها به‌دست آورد؟

نارسائیهای مدل اتمی رادرفورد ـ با آن که مدل اتمی رادرفورد در توجیه پدیده‌های پراکندگی موفق بود ولی پرسشهای دیگری را برانگیخت که پاسخ دادن به آنها از عهده این مدل بر نمی‌آمد. از آن جمله: ترتیب قرار گرفتن الکترونها در اطراف هسته چگونه است؟

چه چیز مانع می‌شود که الکترونهای منفی در اثر نیروی جاذبه الکتریکی روی هسته سقوط نکنند؟

هسته از چه تشکیل یافته است؟

چه چیز باعث می‌شود که با وجود نیروی دافعه بین بارهای مثبت، هسته متلاشی نشود؟



شکل ۱۸-۴ـ طرح ساده کنتور گیگر و طرز استفاده از آن.

این کنتور عبارت است از: لوله استوانه‌ای شکل فلزی C که محتوی گاز است و سیم نازك A که از وسط یك عایق می‌گذرد و بدین وسیله ارتباط الکتریکی آن از بدنه استوانه قطع می‌شود. این سیم وسط استوانه در امتداد محور آن قرار دارد. دهانه استوانه با ورقه نازکی از جنس میکا به نام «پنجره» بسته شده است.

به‌هنگام کار، اختلاف پتانسیل پیوسته‌ای میان آند A (سیم وسط استوانه) و کاتد C (بدنه استوانه) برقرار می‌شود. این اختلاف پتانسیل کمتر از میزانی است که سبب تخلیه الکتریکی در گاز داخل لوله می‌شود.

وقتی ذره آلفا از پنجره وارد استوانه می‌شود در اثر برخورد به ملکولهای گاز، آنها را یونیزه و تعدادی الکترون از آنها آزاد می‌کند. این الکترونها به‌طرف آند شتاب می‌گیرند و در مسیر خود در اثر برخورد به ملکولهای گاز، تعداد بیشتری الکترون آزاد می‌کنند. هجوم این الکترونها یك جریان الکتریکی لحظه‌ای به صورت تك موج (پالس) به وجود می‌آورد که می‌توان آن را تقویت و به یك بلندگو (یا یك دستگاه نشان‌دهنده یا ثبت‌کننده دیگر) هدایت کرد. هر صدای «تیك» بلندگو معرف یك پالس است که به این ترتیب تولید می‌شود.

۱ـ در این‌جا برای اجتناب از تطویل کلام از توضیح در این باره خودداری می‌شود.

رادرفورد شکست مدل خود را درپاسخ دادن به‌این پرسش‌ها تصدیق کرد وصادقانه اظهار داشت: نباید از مدلی که برای گشودن یك معما به‌کار رفته است انتظار داشت معماهای دیگر را نیز بگشاید. بدیهی است مدل کاملتری لازم بود تابه‌این پرسشها پاسخ دهد. به‌دنبال این بحث مدل پیشنهاد شده توسط نیلزبور[1] فیزیکدان دانمارکی را که پس از طرح مدل اتمی رادرفورد به گروه تحقیقاتی او پیوست شرح خواهیم داد.

مدل اتمی بور

گفتیم که طبق مدل رادرفورد، اتم تشکیل شده است از یك هسته با بار مثبت و الکترونهائی با بار منفی که اطراف آن قراردارند. ولی چه چیز با وجود نیروی جاذبه الکتریکی مانع سقوط الکترونها روی هسته می‌شود؟

یکی از پاسخهای ممکن این است که اتم می‌تواند مانند منظومه شمسی باشد و الکترونها در مدارهائی به دورهسته، بچرخند.

بنابراین نیروی جاذبه الکتریکی میان هسته و الکترونها در حکم نیروی جانب مرکزی است که الکترونهـا را در حال حرکت در مدار خود نگاه می‌دارد.

ولی به این پاسخ یك ایراد اساسی درمورد پایداری‌اتم‌وارد است.زیرا طبق‌تئوری‌الکترومانیتیك، وقتی‌یك‌ذره باردار با شتاب‌حرکت‌کند انرژی‌تابش می‌نماید حرکت الکترون به دور هسته اتم تحت‌اثر نیروی‌جانب مرکزی،همواره شتاب‌داراست. بنابراین الکترون انرژی خود را در اثر تابش‌از دست‌می‌دهد و به‌هسته نزدیك شده روی‌آن سقوط می‌کند. (مانند یك ماهواره کـه درقسمت فوقانی آتمسفر در اثـر اصطکاك با هوا انرژی از دست می‌دهد و به‌تدریج به زمین نزدیك شده در روی آن سقوط می‌نماید).

طبق تئوریهای‌مکانیك‌کلاسیك والکترومانیتیك، الکترونی‌که‌انرژی تابش‌می‌کند. باید در زمان‌بسیار کوتـاهی جذب هسته اتم بشود بنابراین اتـم مدل منظومه‌ای فقط درکسر بسیارکوچکی از ثانیه پایدار خواهدماند (واین خلاف‌شواهد مسلم تجربی‌است).

با وجود این اندیشه منظومه‌ای بودن اتم مورد نظر بود و فیزیکدانها درجستجوی یك تئوری بودند که هم مدل منظومه‌ای را شامل شود و هم خطوط منفصل طیف عناصر را توجیه کند.

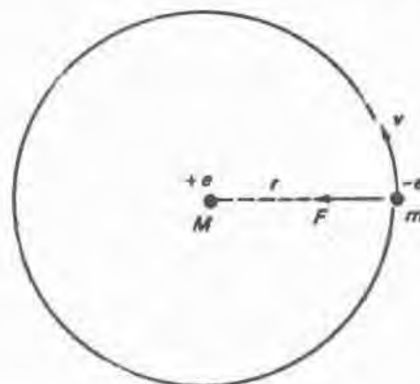
بور موفق‌شد درسالهای۱۹۱۳ـ۱۹۱۲میلادی چنین تئوری را پایه‌گذاری‌کند.

بورکار خود را از اتم ساده ئیدروژن شروع

۱- Niels Bohr (۱۹۶۲ـ۱۸۸۵ م) فیزیکدان دانمارکـی در کپنهاك متولد شد. پدرش استاد فیزیولوژی دانشگاه‌کپنهاك بود. در سال ۱۹۱۱ بور به‌دریافت دکترای خود از دانشگاه کپنهاك موفق شد و بعد از آن مدت یك سال زیر نظر تامسون (Thomson) در کمبریج و یك سال دیگر زیر نظر ارنست رادرفورد در منچستر مطالعه و تحصیل کرد.

در سال ۱۹۱۳که به کپنهاك برگشت تئوری مهم خود را درباره ساختمان اتم ئیدروژن برشته تحریر درآورد وچاپ‌کرد درسال ۱۹۲۰ رئیس انستیتوی فیزیك تئوری دانشگاه‌کپنهاك شد ودرسال ۱۹۳۲جایزه نوبل را دریافت‌کرد.

کرد، او فرض کرد که اتم ئیدروژن باعدد اتمی یك $(Z=1)$ از یك هسته با بار $+e$ و یك الکترون با بار $-e$ تشکیل شده است که الکترون روی مداری بشعاع r بدور هسته دوران می کند. هسته ۱۸۳۶ بار از الکترون سنگین‌تر است از این‌رو آن را در مقابل حرکت الکترون ساکن فرض کرد.



مدار الکترون

شکل ۱۸-۵- ساختمان اتم ئیدروژن طبق فرضیه بور

بور مدل اتمی خودرا براصول فیزیك کلاسیك پایه گذاری کرد و سپس برای توجیه پدیده تابش مفاهیم کوانتائی را چاشنی آن کرد.

در جواب این که چرا «الکترون‌ها بدون آنکه جذب هسته شوند یا ازآن دور گردند روی مدارهای مشخصی قرار می گیرند» گفت:

عامل مؤثر در این مسئله نیروی جانب مرکز است. این نیرو از جنس نیروی الکترواستاتیك می باشد و مقدارش از رابطه $F=k\frac{Zee}{r^2}$ طبق قانون کولن حساب می‌شود. از طرف دیگر نیروی لازم برای حرکت الکترون بر مسیر دایره‌ای شکل برابر $m\frac{v^2}{r}$ می‌باشد و این دو باهم برابرند.

$$m\frac{v^2}{r}=k\frac{Zee}{r^2} \qquad (۱-۱۸)$$

در این رابطه m جرم و e بار و v سرعت الکترون و r شعاع دایره مسیر و Z عدد اتمی و k ضریب ثابتی است که مقدارش در دستگاه SI برابر $K=9\times10^9 Nm^2/C^2$ می باشد.

بور سپس فرضیه دوم خود را باشرط کوانتائی به صورت زیر وارد تئوری خودکرد:

الکترون نمی‌تواند روی هر مدار غیر مشخص پایدار بماند بلکه فقط در مدارهــای معین و مجاز قرار می‌گیردکه در این مدارها تابش نمی‌کند. ویژگی مدارهای مجاز این است که اولاً، شعاع آنها در رابطه ۱۸-۱ صدق میکند. ثانیاً، اندازه حرکت زاویــه‌ای الکترون در این مدارها مضرب درستی از $\frac{h}{2\pi}$ است یعنی:

$$mvr=n\frac{h}{2\pi} \qquad (۲-۱۸)$$

با استفاده از معادلات ۱۸-۱ و ۱۸-۲ شعاع مسیر الکترون و سرعت آن بصورت زیـر بدست می‌آید:

$$r=\frac{n^2h^2}{4\pi^2me^2Zk} \qquad (۳-۱۸)$$

$$v=k\frac{2\pi e^2z}{nh} \qquad (۴-۱۸)$$

مثلاً شعاع اولین مدار مجاز الکترون در اتم هیدروژن به ازای

$n=1$

$Z=1$

$e=-1/602192\times10^{-19}C$

$m = ۹/۱۰۹۵۶ \times ۱۰^{-۳۱} kg$

$h = ۶/۶۲۶۲۰ \times ۱۰^{-۳۴} Js$

$k = ۸/۹۸۷۵۵ \times ۱۰^{۹} Nm^{۲}/C^{۲}$

برابر است با:

$$r_{۱} \simeq ۰/۵۲۹ \mathring{A}$$

و سرعت الکترون در روی این مدار برابر است با:

$$V = ۲/۱۸۷۶۸ \times ۱۰^{۶} \frac{m}{s}$$

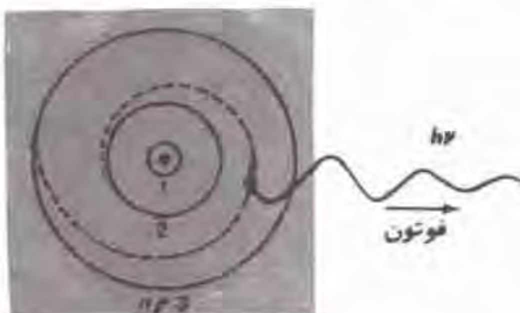
این سرعت درحدود $\frac{۱}{۱۳۷}$ سرعت نور است.

پرسش ۱۸-۵- اگر شعاع اولین مدار اتم ئیدروژن $r_{۰}$ باشدشعاع مدارهای دیگرطبق مدل بور برحسب $r_{۰}$ چه اندازه است ؟

رابطه ۱۸-۴ نشان می‌دهد که‌سرعت الکترون نیز هراندازه دلخواهی نمیتواند باشد و اندازه آن از رابطه $v = \frac{v_{۱}Z}{n}$ بدست‌می‌آید. $v_{۱}$ سرعت برروی نزدیکترین مدار به هسته می‌باشد. با مشخص بودن سرعت الکترون و محیط دایرهٔ مسیر می‌توان تعداد دوری که الکترون در هرثانیه بدور هسته میگردد از رابطه $n = \frac{v}{۲\pi r}$ بدست‌آورد. این‌تعداددرحدود $۱۰^{۱۵}$ دور برثانیه است که‌حدود بزرگی آن باحدودبزرگی فرکانس نورهای مرئی برابر است.

پرش الکترون از یک مدار به مدار دیگر

سومین‌وآخرین فرضیه بوردرمورد اتم ئیدروژن مربوط به تابش نور است. بور اعلام کرد که‌وقتی الکترون روی مدار ثابتی حرکت می‌کند نمی‌تواند نور تابش کند و تابش‌نور فقط در اثر پرش‌الکترون از یك مدار بـه مدار دیگر امکان‌پذیر است (شکل ۱۸-۶). این‌دانشمند معتقد بودکه فرکانس نورتابش شده ارتباطی به فرکانس حرکت دورانی الکترون ندارد و فقط مربوط به اختلاف انرژی بین مدار ابتدائی و مدار انتهائی است یعنی:



شکل ۱۸-۶- نمودار ساده فرضیه‌کوانتائی بور درمورد تابش اتم هیدروژن

$$E_F - E_i = hf \quad (۱۸-۵)$$

در رابطه بالا E_i انرژی مدار ابتدائی و E_F انرژی مدار انتهائی و h ثابت پلانك و f فرکانس نور است. لازم به تذکر است که $E_{۱}$ و $E_{۲}$ و $E_{۳}$ و $E_{۴}$ و .... انرژی کل الکترون روی مدارهائی به ازاء $n = ۱$ و $n = ۲$ و $n = ۳$ و ... است. مثلاً وقتی الکترون روی مدار $n = ۳$ است انـرژی آن $E_{۳}$ می‌باشد و وقتی مطابق شکل۱۸-۶ این الکترون بمدار $n = ۲$ پرش کند انرژی آن برابر $E_{۲}$ می‌شود و دراین‌حالت اختلاف انرژی $E_{۳} - E_{۲}$ بصورت انرژی تابشی معادل hf از اتم تابش می‌گردد.

اتم‌های عادی و اتم‌های تحریک شده

وقتی کـه تنها الکترون اتـم ئیدروژن ، روی نزدیکترین مدار بهسته ($n=1$) قرار گرفته باشد، گفته می‌شود که اتم در حالت عادی و یـا در سطح انرژی **بنیادی** می‌باشد ، در دما و فشار معمولی اغلب اتم‌های ئیدروژن در چنین حالتی هستند . اگر داخل یك لوله مولد پرتوهای کاتودیك کـه محتوی گاز ئیدروژن است عمل تخلیه الکتریکی انجام دهیم بـه طوری که پرتوهای کاتودیك تولید شود، الکترون‌های موجود دراین پرتوها بـه اتم‌های ئیدروژن برخورد می‌کنند. در اثر برخورد الکترون به اتمهای ئیدروژن وانتقال انرژی بهآنها ممکن استاتم ئیدروژن کاملا الکترون خود را از دست بدهد که دراینصورت اتم را یونیزه می‌گویند، ولی اگرالکترون ازمدار داخلی بـه مدار خارجی رانده شود اتم را تحریك شده می‌گویند . یك اتم نمی‌تواند مدت زیادی در حالت تحریك باقی بماند، زیرا الکترون تحت تأثیرنیروی جاذبه هسته مجبور می‌شود کـه به مدار اولیه خود برگردد و تمام یا قسمتی از انرژی دریافت شده را بصورت‌فوتون از دست بدهد. لازم‌نیست یك‌الکترون تحریك شده با یك پرش روی مدار داخلی($n=1$) قرارگیرد، بلکه ممکن‌است الکترون پرش‌های‌متوالی انجام دهد و تا رسیدن به مدار داخلی امواج‌تابشی با فرکانسهای متفاوت صادرکند.

ترازهای انرژی

انرژی‌کل الکترونی‌که درهریك از مدارهای مجاز به دور هسته می‌چرخد برابر مجموع انـرژی پتانسیل E_p و انرژی جنبشی E_c آن الکترون است یعنی:

$$E=E_p+E_c \quad (۶-۱۸)$$

این انرژی برای مدارهای دایره‌ای شکل اتم ئیدروژن به‌وسیله بور به‌صورت زیرداده شده‌است:

$$E=-R\frac{Z^2}{n^2} \quad (۷-۱۸)$$

در این رابطه[1] Z عدد اتمی ، n عدد کوانتومی و R مقدار ثابتی است برابر $R=\frac{2\pi^2 me^4K^2}{h}$ که با توجه بهمقادیرعددی m و e و K و h برابر است با:

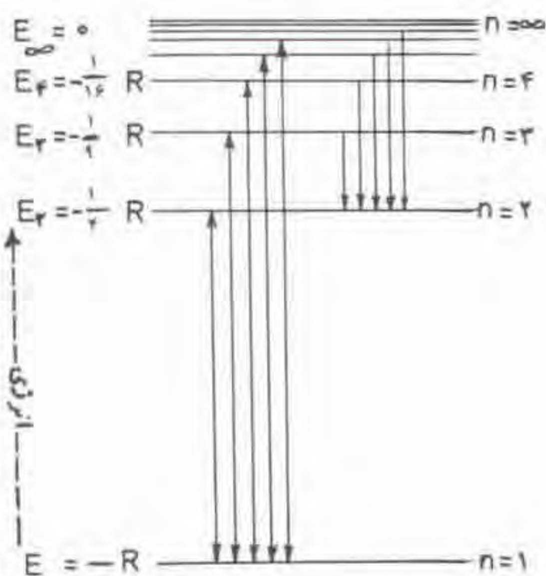
$$R\simeq ۲/۱۸\times ۱۰^{-۱۸} \text{ ژول} \quad (۸-۱۸)$$

رابطه ۱۸ـ۷ برای تعیین انـرژی الکترون ، وقتی‌که یکی از مدارهای مجاز خودرا اشغال‌می‌کند به‌کار می‌رود.

۱ــ به‌دست آوردن این رابطه آسان است . کافی است از ترکیب دو معادله ۱۸ــ۱ و ۱۸ــ۲ انرژی جنبشی الکترون حساب شود، $E_c=\frac{1}{2}mV^2=K\frac{Ze^2}{2r}$ ، پتانسیل بارالکتریکی e (الکترون)که درفاصله r از بار الکتریکی Ze (هسته) قرار دارد برابر $V=\frac{KZe}{r}$ است. بـرای محاسبه انـرژی پتانسیل الکترون بایداین‌پتانسیل‌را در بارالکتریکی$-e$ الکترون ضرب‌کرد. بنا براین $E_p=-Ve=-K\frac{Ze^2}{r}$. با قراردادن این مقادیردررابطه ۱۸ــ۶ وباجاگذاری r توسط رابطه ۱۸ــ۳، معادله ۱۸ـ۷ به دست می‌آید.

معمولاً به جای‌آن‌که ترازهای انرژی اتم را به‌شکل دوایری با «مقیاس شعاع دایره»[1] نشان دهند این‌ترازهارا به‌وسیله خطوط‌افقی «با مقیاس انرژی»، مطابق شکل ۱۸-۷ نمایش می‌دهند و نمودار حاصل را «نمودار تراز انرژی» می‌نامند.

اهمیت این نوع نمودار بدین جهت است که نشان می‌دهد انرژی hf هرفوتون‌درست برابراختلاف دو انرژی در دو وضع مجاز الکترون است.



شکل ۱۸-۷-نمودار تراز انرژی برای اتم ئیدروژن. خطوط قائم نمایش پرشهای الکترون است.

پرسش ۱۸-۶- در شکل ۱۸-۷ دیده می‌شود که هرچه شماره تراز انرژی بزرگتر باشد ترازهـا به‌هم نزدیکترند. علت چیست؟

پرسش ۱۸-۷- چگونه‌می‌توان رنگهای‌مختلف خطوط طیف ئیدروژن را به‌کمك نمودار تراز انرژی توجیه‌کرد؟

نارسائیهای مدل بور- تئوری بور موفقیتهای بزرگی بین سالهای ۱۹۱۳ و ۱۹۲۴ میلادی به‌دست آورد. ولی کم‌کم‌مسائلی‌پیش‌آمدکه نارسائی‌آن‌درحل آنهاآشکارشد، تئوری‌بوربرای توجیه طیف هیدروژن وطیف اتمهایی که‌آخرین لایه‌آنها تك‌الکترونی است بسیارموفق‌است. اما درمورداتمهائی‌که درآخرین‌لایه الکترونی خود دو، یا بیش‌از دوالکترون دارنداختلاف میان آزمایش و تئوری کاملاً مشهود است.

آزمایش همچنین نشان می‌دهدکه وقتی‌نمونه‌ای از یك عنصر در میدان الکتریکی یـا مغناطیسی قرار می‌گیرد درطیف خطی‌آن خطوط اضافی پیدامی‌شود. مثلاً در یك میدان مغناطیسی ، هر خط معمولی طیف بـه چند خط باریکتر تجزیه می‌گردد . تئوری بور نمی‌توانست بـه‌طور کمی علت این تجزیه را توجیه کند.

علاوه براین، روشنائی خطوط طیف یك‌عنصر نسبت به‌یکدیگر متفاوت است و این‌تفاوت بستگی به احتمال انتقال الکترونها از یك تراز انرژی به تراز انرژی دیگردارد. در تئوری بورروشی‌برای‌پیشگوئی این روشنائی نسبی منظور نشده بـود . فیزیکدانها می‌خواستند به‌یك تئوری‌دست یابندکه امکان‌محاسبه احتمال انتقال‌الکترونها را از یك‌تراز انرژی به‌تراز دیگر، به آنان بدهد.

از سال ۱۹۲۰ میلادی به بعد، تئوری بور با

---

[1] ـ به‌شکل ۱۸-۱۲ مراجعه‌کنید.

وجودموفقیت بزرگی که داشت در ماورای قلمروخود نارسائی نشان داد.

امروزه با پیشرفتهای جدید مکانیك کوانتیك تئوری بور با وجود اصلاحاتی که درآن به‌عمل آمده تقریباً کنار گذارده شده است ولی در عین‌حال مثال زیبائی از یك مدل فیزیکی موفقیت‌آمیز است.

پاره‌ای از ویژگیهای مدل کوانتومی

ذرات تشکیل دهنده اتم‌دارای خواص ویژه‌ای هستندکه آنها را خواص کوانتومی نامیده‌اند . این خواص‌ازقوانین‌مکانیك کوانتیك[1] پیروی‌می‌کنند.طبیعت این قوانین‌طوری‌است که بما اجازه نمی‌دهد تاشکل هندسی یا مکانیکی مشخصی برای اتم مجسم کنیم.

مهمترین ویژگی این قانونها کـه آنها را از قوانین مکانیك کلاسیك متمایز می‌سازد این است کـه کمیتهائی مانند اندازه حرکت و انرژی، که حرکت یك الکترون را در اتم مشخص می‌کنند ، کوانتائی هستندیعنی‌نمی‌توانندهرمقدار دلخواهی‌را داشته‌باشند بلکه فقط مقادیر مشخصی را دارا خواهند بود (به طوری‌که دیدیم این ویژگی در مدل اتمی بور وارد شده است).

در واقع تصویر اتم، بطریقی‌که در مدل بور به‌صورت الگوی‌کوچکی از منظومه شمسی‌نشان داده شد، نمی‌تواند ساختمان حقیقی اتم را منعکس کند و همانطور که در بحث ترازهای انرژی بیان کردیم ، بهتراین است که به‌جای مدارهای‌مجاز اتم بور،مقادیر مجاز انرژی الکترون‌درنظر گرفته‌شود. زیرا وقتی‌یك الکترون تحت اثر نیروی جاذبه هسته اتم حرکت می‌کند دارای انرژی پتانسیل و جنبشی است کـه در مدارهای‌مختلف‌متفاوت‌است. بنابراین به‌جای‌مدارهای حرکت الکترون ، «ترازهای انرژی» را در نظـر می‌گیریم[2]. آن چه‌که‌قبلاً پرش الکترون از یك مدار به مداردیگرنامیده شد، درواقع یك نوع تغییرحالت انرژی است، یعنی انتقال از یك حالت با یك مقدار انرژی معین به‌حالت دیگر با مقدار انرژی معین‌دیگر، این انتقال نیز با پرش صورت می گیرد. یعنی انرژی الکترون مستقیماً به‌یك‌اندازه معین(مثلاً یك‌کوانتوم) تغییر می‌کند و تمام مقادیر واسطه حذف می گردند.

ساختمان هسته اتم

هسته اتم با وجود ابعاد بینهایت‌کوچك خود، ساختمان پیچیده‌ای دارد. این هسته شامل دو نوع ذره است: پروتون و نوترون.

پروتون به‌تنهائی همان هسته‌اتم ئیدروژن‌است که بار مثبت دارد. اندازه بار پروتون از لحاظ قدر مطلق برابر اندازه بار الکترون است.

نوترون بدون بارالکتریکی است. هردو نوع

۱ــ بحث درباره این اصلاحات و بررسی اتم از دیدکوانتوم مکانیك خارج از برنامه وکاراین‌کتاب است. درصورتی‌که علاقمند باشید می‌توانید به کتب فیزیك اتمی‌که بـه فارسی نوشته شده و جزو انتشارات دانشگاهی است مراجعه‌کنید.

۲ ــ چون اعدادکوانتائی در درس شیمی مورد بحث قرار می‌گیرد در اینجا از تکرار آنها خودداری می‌شود.

ذرات هسته‌ای را «نوکلئون»[1] هم می‌نامند. جرم هر یك از این ذرات درحدود $1/7 \times 10^{-24}$ گرم است.

تعداد کل نوکلئونها، یعنی مجموع پروتونها و نوترونها در هسته اتم را ، چنانکه می‌دانید، «عدد جرمی» می‌گویند و به A نمایش می‌دهند.

تعداد پروتونهای درون هسته اتم هر عنصر را که به Z نمایش داده می‌شود «عدد اتمی» آن عنصر می‌نامند. Z نمایش شماره‌خانه عنصردرجدول تناوبی عناصر (جدول مندلیف) نیزهست، زیرا دراین جدول عناصر به‌ترتیب‌افزایش بارالکتریکی‌هسته‌تنظیم‌شده‌اند. بنابراین Z در جدول مندلیف نشان می‌دهد که بار الکتریکی مثبت هسته در اتم عنصرمربوطه چندبرابر بار یك‌الکترون است. به‌همین‌جهت Z را «عدد بار» نیز مـی‌گویند . در نتیجه عدد اتمی یك عنصر در جدول مندلیف، تعداد الکترونهای اتم آن عنصر را وقتی‌که از لحاظ بار الکتریکی خنثی‌است به دست می‌دهد.

نکته اخیرقابل توجه است، زیرایك اتم‌ممکن است الکترونهائی بیشتر یاکمتر از آنچه کـه لازم است تا بار هسته‌اش را خنثی‌کند داشته باشد:

ممکن است یك یا چند الکترون از اتم جدا شود. برای این‌کار معمولاً انرژی زیادی لازم نیست زیرا الکترونهائی که از هسته اتم دور هستند نیروی پیوستگیشان به هسته نسبتاً ضعیف است . هنگامی‌که الکترونها ازاتم‌جدا می‌شوند، هسته‌تغییرنمی‌کند ولی اتم دیگر خنثی نیست و تبدیل به‌یون مثبت می‌گردد.

از طرف دیگر ممکن است الکترون «اضافی» به اتم خنثی متصل شود. دراین حالت اتم به‌صورت یون منفی در می‌آید، زیرا بار هسته بدون تغییر باقی می‌ماند.

پرسش ۱۸-۸- با چه طریقه‌هائی ممکن است اتم به یون تبدیل شود؟

پرسش ۱۸-۹- آیاممکن‌است‌تمام‌الکترونهای اتم از آن خارج شوند؟

در واقع، وضعیت شیمیائی یك عنصر بستگی به تعداد پروتونهای درون هستهٔ اتمهای آن دارد نه به تعداد الکترونها (زیرا دیدیم که تعداد الکترونها به سهولت ممکن است تغییرکند). مثلاً اگر ازاتم‌آهن یکی از۲۶ الکترون‌آن را خارج سازیم‌یك یون‌آهن خواهیم داشت ولی اگر یك پروتون را از هسته اتم آهن خارج سازیـم (این‌کار نیز ممکن است انجام گیرد ولی مطلقاً با روشهای دیگر) تغییر اساسی در خواص این اتم حاصل خواهد شد، یعنی اتم‌آهن به اتم منگنز تبدیل خواهد گشت.

تعداد نوترونها - ایزوتوپ- هسته‌اتمهای یك عنصر ممکن است دارای تعداد نوترونهای متفاوت باشد. مثلاً هسته اتـم آهن معمولی علاوه بـر ۲۶ پروتون دارای ۳۰نوترون است (این‌متداولترین‌هسته آهن است و معمولاً آهن شامل ۹۱/۷٪ از این‌نوع هسته می‌باشد). ولی هسته‌های دیگری از آهن‌موجود است‌که تعداد نوترونهای‌آنها (باهمین‌تعداد پروتون) ۲۸، ۳۱ یا ۳۲ است. همه اینها هسته‌های‌آهن هستند وخواص شیمیائی اتمهائی که دارای چنین هسته‌های متفاوت می‌باشند مطلقاً یکسان وفقط جرم‌آنهامتفاوت است .

بنا به‌تعریف، ایزوتوپها اتمهایی هستند که Z

1_ Nucleon

(عدد اتمی) هسته آنها یکی است ولی تعداد نوترونهای آنها متفاوت است. در نتیجه عدد جرمی آنها نیز متفاوت خواهد بود. ولی چون تعداد الکترونهای مداری همه آنها Z است پس این اتمها در یك خانه جدول تناوبی قرار دارند (معنی ایزوتوپ نیز همین است) .

بدیهی است بامعلوم بودن A (عدد جرمی) و Z (عدد اتمی) در هر اتم ، N (عدد نوترونها) به آسانی معین می‌شود:

$$N = A - Z \qquad (۹-۱۸)$$

دراینجا لازم است یادآور شویم که ایزوتوپهای اتمها را نمی‌توان از روی خواص شیمیائی آنها تشخیص داد وبرخی از خواص هسته‌های آنها ممکن است اساساً متفاوت باشد.

نیروهای هسته‌ای - نوکلئونها (پروتونها و نوترونها) درون هسته با نیروهای ویـژه‌ای به نام «نیروهای هسته‌ای» که نه الکتریکی هستند ونه ثقلی، به یکدیگر الصاق شده‌اند[1]. این نیروها از لحاظ مقدار به‌مراتب بزرگتر از نیروهای الکتریکی می‌باشند که الکترونها و هسته‌ها را بهم پیوند می‌دهند یکی از ویژگیهای مهم نیروهـای هسته‌ای این است که تنها وقتی اثر می‌کنند که فاصله بین نوکلئونها بسیار کم، یعنی در حدود اندازه ابعاد هسته باشد و با افزایش فاصله به‌سرعت کاهش می‌یابند. بههمین‌جهت نیروهای هسته‌ای را «نیروهای با برد کوتاه» نیز نامیده‌اند.

نظر به همین برد بسیار کوتاه (حدود 10^{-15} متر) این نیروهـا در برخورد بین ملکولها و اتمهای گازها بهیکدیگر، یا در برخورد ذرات آلفا بههسته اتم (که دامنه عمل نیروهای الکتروستاتیکی کولنی است) نقشی ندارند.

پایداری هسته‌ها - هسته بیشتر اتمهای عناصر معمولی پایدار است و اگر به حال خود گذاشته شود همیشه بدون تغییر می‌ماند . واکنشهای شیمیائی، چه انرژی آزاد کنند و چه جذب نمایند هسته اتمها را تغییر نمی‌دهند. بلکه تنها لایه الکترونی خارجی اتم دراین واکنشها درگیر می‌شود.

با وجود این تعداد زیادی هسته‌های ناپایدار وجود دارند که خود بخود پرتوهائی تابش می‌کنند ودراثر این تابش تغییراتی در آنها حاصل می‌شود. این قبیل هسته‌ها را «رادیواکتیو» می‌نامند تعدادی از این هسته‌های ناپایدار مستقیماً در طبیعت یافت می‌شوند وآنها را «رادیواکتیو طبیعی[2]» می‌گویند.

ناپایداری درهسته ممکن است دراثر بمباران هسته توسط پرتابه‌های مناسبی مانند پروتون یا نوترون حاصل شود . اینگونه هسته‌هـا را«رادیو-اکتیو مصنوعی» می‌نامند.

سری تبدیلات مواد رادیواکتیو

در سال ۱۹۰۳ میلادی رادرفـورد و سدی[3] اظهار داشتند که رادیو اکتیویته نتیجه متلاشی شدن

۱- این نیروها بین پروتون-پروتون ، پروتون-نوترون یا نوترون-نوترون اعمال می‌شوند.

۲- به فصل مربوط به رادیواکتیویته درکتاب فیزیك سال‌سوم دوره نظری مراجعه شود.

۳- Soddy

مداوم هسته بعضی از اتمها است. این اتم هـای رادیواکتیودرموقع متلاشی‌شدن پرتوهای α و β و γ ازخود منتشر می‌کنند و به اتمهای رادیواکتیو دیگر تبدیل می‌شوند وآنها به‌نوبه‌خود متلاشی می‌گردند تاآنکه یك اتم پایدارتبدیل شوند.

مجموعه این تبدیلات متوالی که ازیك عنصر سنگین شروع شده و منجر به پیدایش عنصر پایدار سرب می‌شود سری تبدیلات مواد رادیواکتیو نامیده می‌شود. تا بحال چهارسری از اجسام رادیـواکتیو شناخته شده است‌که سری اول با عنصراورانیم۲۳۸ وسری دوم با توریم ۲۳۲ و سری سوم با اورانیم ۲۳۵ وسری‌چهارم باپلوتونیم ۲۴۱ شروع می‌شود. جدول ۱۸ــ۱ سری تبدیلات اورانیم ۲۳۸ را نشان می‌دهد.

قوانین تلاشی اجسام رادیواکتیو

رادرفورد وسدی با مطالعه اتمها درسری‌های مواد رادیواکتیو موفق به‌کشف دوقانون زیر شدند.

قانون اول ــ هرگاه عنصری یك ذره α تابش کند به عنصری تبدیل می‌شود کـه خواص شیمیائی

نام عنصر	علامت	عدد اتمی	جرم اتمی	اشعه صادره	نیمه عمر
اورانیم	$_{92}U^{238}$	۹۲	۲۳۸	α	$4/5\times10^{9}$ سال
توریم	$_{90}Th^{234}$	۹۰	۲۳۴	β	۲۴/۵ روز
پروتاکتینیوم	$_{91}Pa^{234}$	۹۱	۲۳۴	β	۱/۱۴ دقیقه
اورانیم	$_{92}U^{234}$	۹۲	۲۳۴	α	3×10^{5} سال
توریم	$_{90}Th^{230}$	۹۰	۲۳۰	α	۸۳/۰۰۰ سال
رادیم	$_{88}Ra^{226}$	۸۸	۲۲۶	α	۱۶۰۰ سال
رادون	$_{86}Rn^{222}$	۸۶	۲۲۲	α	۳/۸۲ روز
پلونیم	$_{84}Po^{218}$	۸۴	۲۱۸	α	۳/۰۵ دقیقه
سرب	$_{82}Pb^{214}$	۸۲	۲۱۴	β	۲۶/۸ دقیقه
بیسموت	$_{83}Bi^{214}$	۸۳	۲۱۴	α,β	۱۹/۷ دقیقه
پلونیم	$_{84}Po^{214}$	۸۴	۲۱۴	α	10^{6} ثانیه
تالیم	$_{81}Tl^{210}$	۸۱	۲۱۰	β	۱/۳۲ دقیقه
سرب	$_{82}Pb^{210}$	۸۲	۲۱۰	β	۲۲ سال
بیسموت	$_{83}Bi^{210}$	۸۳	۲۱۰	β	۵ روز
پلونیم	$_{84}Po^{210}$	۸۴	۲۱۰	α	۱۴۰ روز
سرب	$_{82}Pb^{206}$	۸۲	۲۰۶	پایدار	بی‌نهایت

جدول ۱۸-۱ سری تبدیلات اورانیوم ۲۳۸

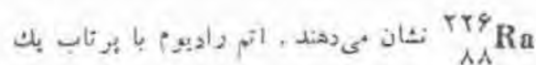
آن مشابه عنصری است که درجدول مندلیف در دو خانه قبلی قرار دارد.

قانون دوم ــ هرگاه یك عنصر از راه تشعشع یك ذره β دچار تلاشی هسته شود به عنصری تبدیل می‌شود که خواص شیمیائی آن مشابه عنصری بعدی درجدول تناوبی است.

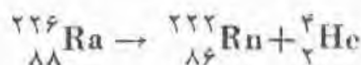
رادرفورد و سدی نتوانستند این دو قانون را که ازراه‌آزمایش بدست‌آورده بودند بکمك تئوری توضیح‌دهند تاآنکه پس‌از کشف نوترون، دانشمندان دیگر توانستند ازلحاظ تئوری نیزآن قوانین را تفسیر نمایند و ما دردنباله بحث تحت عنوان تلاشی آلفائی وتلاشی بتائی‌آن‌ها را توضیح می‌دهیم.

تلاشی آلفائی

می‌دانیم که یك ذره α از۲ پروتون و۲نوترون تشکیل شده است $\left({}^{4}_{2}\text{He}\right)$. هنگامی که یك اتم یك ذره آلفا گسیل می‌دارد هسته آن دو واحد بار الکتریکی مثبت ازدست می‌دهد و درنتیجه عدد اتمی آن به اندازه ۲ واحد کم می‌شود وعنصر بناچار در جدول تناوبی به دو خانه قبل منتقل می‌شود. برای نمونه رادیوم را درنظر می گیریم: عدد جرمی‌رادیوم ۲۲۶ و عدد اتمی آن ۸۸ است و آن را با علامت ${}^{226}_{88}\text{Ra}$

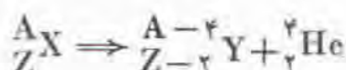


نشان می‌دهند . اتم رادیوم با پرتاب یك ذره α بخارج ۴ واحدجرمی ازدست داده وبه‌رادون تبدیل می‌شود کــه آن را بــا عـلامت ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ مشخص می‌سازند. این‌تلاشی هسته رادیوم رامی‌توان با معادلهٔ ساده زیرنمایش داد :



$${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He}$$

بطورکلی وقتی هسته مادر X که عدد جرمی آن A وعدد اتمی‌آن Z است یك‌ذره α صادر کند یك هسته دختر مانند Y بوجود می‌آید که برای نشان دادن تبدیلات آن می‌توان رابطهٔ زیررا بکار برد :



$${}^{A}_{Z}X \Longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\text{He}$$

تلاشی بتائی

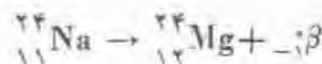
چگونگی تلاشی از طریق تابش β (که طبق قانون دوم انجام می‌گیرد) موضوع پیچیده‌ای است که با نیروهای داخل هسته و مبادله انرژی پیوندی مربوط می‌باشد. آنچه دراینجا می‌توان به آن اشاره کرد این است‌که :

در تلاشی بتائی، یك نوترون به یك پروتون ویك الکترون تبدیل مــی‌شود[1] و الکترون حاصل از هسته اتم خارج می گردد. دراثر خروج این الکترون عدد جرمی ثابت می‌ماند ولی باپیدایش یك پروتون عدد اتمی یکی افزایش می‌یابد واین عنصرجدید در جدول تناوبی عناصر در خانه بعدی قــرار میگیرد و خواص شیمیائی‌آن را می‌یابد.

برای نمونه تلاشی بتائــی رادیو ایزوتوپ سدیم $\left({}^{24}_{11}\text{Na}\right)$ را درنظر می گیریم که با ازدست

۱ــ طبق قانون بقای اندازه حرکت و انرژی ، علاوه بر پروتون و الکترون ، یك ذره آنتی‌نوتریتو نیز تولید می‌شود و آزمایش هم وجود آن را تأیید می‌کند.

دادن یك ذره β به منیزیم $\left({}^{24}_{12}Mg\right)$ تبدیل می‌شود.



$${}^{24}_{11}Na \rightarrow {}^{24}_{12}Mg + {}^{0}_{-1}\beta$$

بطور کلی می‌توان در تلاشی بتائی رابطه زیر را نوشت:



$${}^{A}_{Z}X \Rightarrow {}_{Z+1}{}^{A}Y + {}^{0}_{-1}e$$

پرسش ۱۸-۱۰ - می‌دانید برای هر عنصر رادیواکتیو «نیمه‌عمر» درنظر گرفته می‌شود. با آشنائی کـه در این باره دارید بگوئید نیمه عمر یك عنصر رادیواکتیو چیست؟

کشف نوترون

نوترون، یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده هسته اتم است که درسال ۱۹۳۲ بوسیله «چادویك[۱]» کشف شد. فعالیت‌های مربوط به کشف نوترون ازسال ۱۹۳۰ میلادی به وسیلهٔ دو نفر فیزیك دان آلمانی بنام بته و بکر[۲] شروع شد. آنها متوجه شدند که وقتی بریلیوم یا بعضی ازعناصر سبك دیگر بوسیله ذرات α بمباران شوند نوعی پرتو با قدرت نفوذ زیاد ازآنها صادرمی‌شود که می‌تواند بسهولت ازصفحات سرب بضخامت چند سانتیمتر عبورکند (شکل ۱۸-۸).

ایرن کوری[۳]، دختر مادام کوری همراه شوهر خود ژولیو[۴] با انجام آزمایش‌هائی دریافت که: اگر این پرتوها به تـرکیبات ئیدروژن دار برخورد کند موجب گسیل پروتون‌هائـی با انرژی بسیار زیاد می‌گردد. این دانشمندان ازمجموعه آزمایش‌های خود چنین پنداشتند که پرتوهای خارج شده از بریلیوم نوعی اشعه γ با قدرت نفوذ بسیارزیاداست ازاین‌رو اقدام به اندازه‌گیری انرژی فوتون‌های این پرتوهای فرضی پرداختند، ولی نتیجه محاسبات آنها با اصل بقای اندازه‌حرکت واصل بقای انرژی مطابقت نکرد.

در آزمایش چادویك، صفحه فلزی بریلیوم بوسیله ذرات α بمباران‌شده وپرتوهای جدید حاصل از این عمل بطرف صفحه پارافین هدایت می‌شوند. سپس از صفحه پارافین نیز تعدادی پروتون بخارج پرتاب می‌شود کـه وجود آنها را می‌توان آشکار کرد.

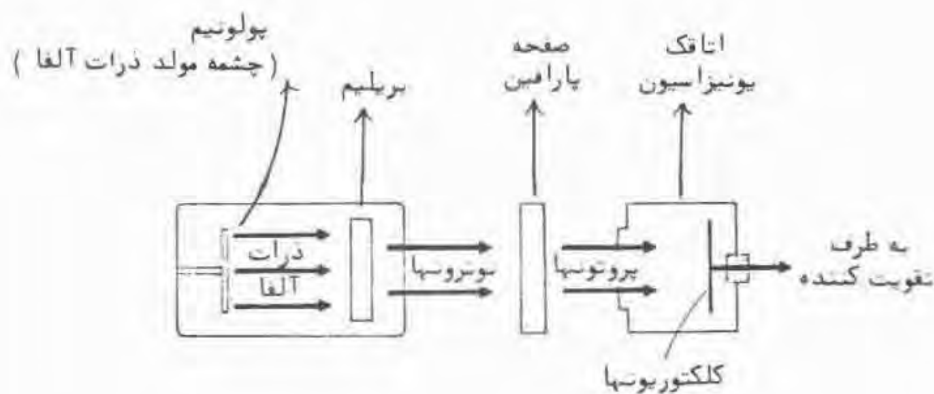
چادویك با اندازه‌گیری انرژی پروتون‌هـا نشان داد که نتیجه محاسبات به شرطی با اصل بقاء اندازه حرکت وانرژی مطابقت می‌کندکه پروتون‌ها نتیجه برخورد ذراتی بدون بار و با جرمـی معادل جـرم آنها باشند. چادویك ایـن ذرات بی‌بار را «نوترون» نامید.

۱- Sir James Chadwick (۱۸۹۱-) فیزیکدان انگلیسی که درسال ۱۹۳۴ میلادی برای کشف نوترون جایزه نوبل گرفت.

۲- H. Becker و W. Bathe

۳- Irène Curie

۴- Frédéric Joliot Curie



شکل ۱۸-۸- چادویك در سال ۱۹۳۲ نوترون راکشف کرد

تلاشی هسته بوسیله نوترون

کشف نوترون از نظر فیزیکدانها بسیار مهم بود زیــرا آنان می‌توانستند برای شکافت اتم از نوترون بعنوان یك ذره مناسب استفاده کنند. قبلاً برای شکافت اتم علاوه بر ذرات α از پروتونها و دوترون (هسته ئیدروژن سنگین) استفاده می‌شد، ولی بارمثبت این ذرات مانع ازاین بود که آنها باسرعت زیاد به هسته که بارآن نیز مثبت است برخورد کنند و باعث متلاشی شدن آن شوند. به عبارت دیگر با وجود آنکه شتاب دهنده‌ها این ذرات را به سرعت بسیارزیاد می‌رساندند وآنها را بطرف هسته پرتاب می‌کردنــد فقط تعداد کمی از ذرات پــرتاب شده می‌توانست بداخل هسته نفوذ کند و باعث شکافت آن شود.

پس از کشف نوترون مشخص شد کــه اغلب عناصررا می‌توان بااستفاده ازذرات نوترون شکافت وازاین راه عناصرجدیدی بدست آورد.

به عنوان مثال لیتیم را درنظر می‌گیریم، اگر اتمهای این عنصررا با ذرات نوترون بمباران کنیم حاصل کاریکی ازایزوتوپهای ئیدروژن بنام تریتیم ($^{3}_{1}H$) خواهد بود که خود پرتاب‌کننده ذرات β با نیمه عمر ۱۲/۲۶ سال است.

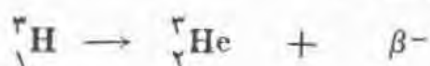
درفعل وانفعالات هسته‌ای نوترون را باعلامت «$^{1}_{0}n$» نشان می‌دهند (عدد جرمی آن برابر یك وبار الکتریکی آن صفراست). باتوجه به‌مطالب بالارابطه متلاشی شدن هسته لیتیم با نوترون را بصورت زیر می‌توان نوشت:



$$^{6}_{3}Li + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He$$

هسته هسته نوترون هسته
هلیوم تریتیوم لیتیوم

تلاشی تریتیوم که دنباله آن روی می‌دهد بشکل زیراست.



$$^{3}_{1}H \longrightarrow ^{3}_{2}He + \beta^{-}$$

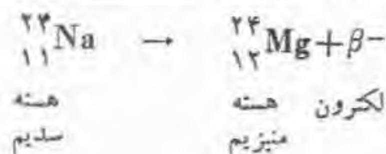
الکترون (ذره بتا) — هسته ایزوتوپ هلیوم — هسته تریتیوم

مثال دیگر تلاشی هسته منیزیم بوسیله نوترون است. در نتیجه برخورد یك نوترون با هسته اتم منیزیم، سدیم ۲۴ همراه با یك پروتون بدست می‌آید. نیمه عمرسدیم بدست‌آمده ۱۵ ساعت است و سدیم بدست آمده خودبخود متلاشی شده و تولید منیزیم ویك ذره بتا می‌کند. فعل وانفعالات فوق رابصورت زیرمی‌توان نوشت:



$$^{24}_{12}Mg + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{24}_{11}Na + ^{1}_{1}H$$

هستهٔ منیزیم	نوترون	هستهٔ رادیو ایزوتوپ سدیم	پروتون هسته ئیدروژن



$$^{24}_{11}Na \rightarrow ^{24}_{12}Mg + \beta^-$$

بطوری کــه ملاحظه می‌شود سدیم ۲۴ نیز دوباره به‌منیزیم ۲۴ تبدیل می‌شود.

واندوگراف، شتاب دهنده ذرات

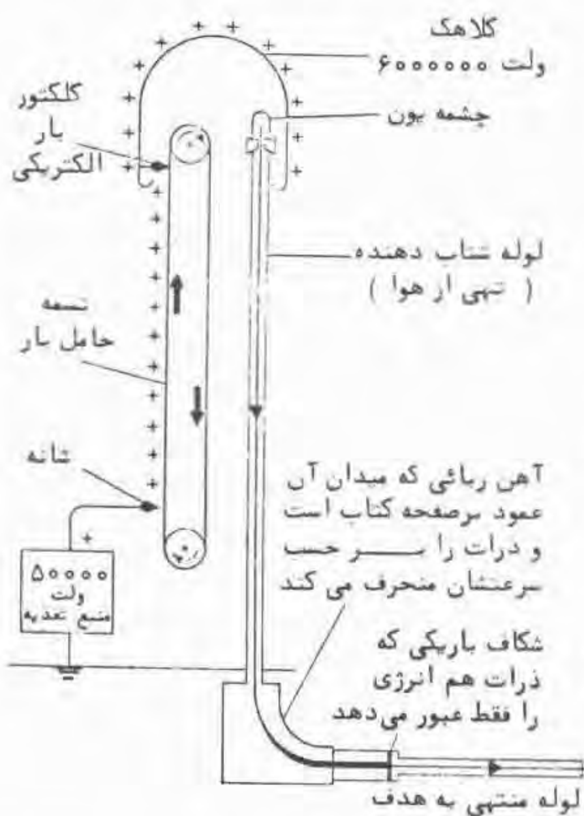
واندوگراف، یك‌نوع مولد الکتریسیته ساکن می‌باشدکه می‌تواند اختلاف پتانسیل‌های بسیار زیاد تاحدود شش میلیون ولت ایجاد کند. این اختلاف پتانسیل زیاد می‌تواند ذره‌های باردار مانند ذرات α را شتاب داده و به سرعت‌های بسیار زیاد برساند تا بوسیله‌آن‌ها بمباران اتم و شکافت‌آن صورت گیرد.

در ساختمان واندوگراف دو خاصیت زیر مورد توجه قرارگرفته است.

۱ــ اگریك جسم رسانای توخالی را باردار کنیم تمام بارها در سطح خارجی آن جسم جمع می‌شوند.

۲ــ تراکم بار در نقاط نوك تیزجسم بیش از سایر جاها است.

درشکل ۱۸ــ۹ ساختمان وطرزکارواندوگراف نشان داده شده است. در این دستگاه پتانسیل شانهٔ پخش بوسیله یك مدار شامل ترانسفورماتور و یك‌سوکننده تأمین می‌شود. شانه پخش دارای‌زائده‌های نوك تیز است وتسمه واندوگراف ازکاغذعایق مخصوصی ساخته شده است.



شکل ۱۸-۹- شتاب دهنده واندوگراف

بارهای الکتریکی پس ازانتقال ازشانه پخش به‌تسمه بطرف بالا برده مــی‌شوند و بوسیله رابط

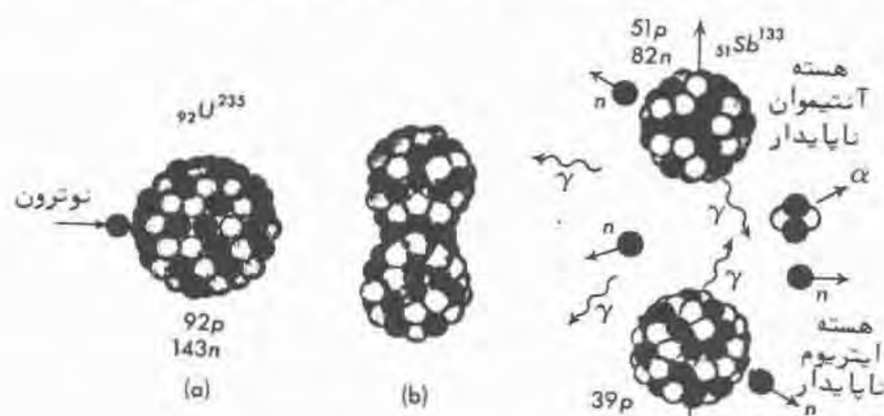
دیگری بنام کلکتور در سطح خارجــی قطب بالائی که روی پایه عایقی قرار دارد جمع شده و پتانسیل زیادی ایجاد مــی‌کنند (حدود ۶×۱۰^{۶} ولت) و پتانسیل قطب بالائی راتاآن حد افزایش می‌دهند که بین هوای خارج وسطح خارجی‌آن تخلیه الکتریکی انجام بگیرد. بــرای بالا بــردن پتانسیل ماشین واندوگراف می‌توان آن‌را داخل محفظه‌ای‌که پر از گازنیتروژن یافرئون[۱] با فشارزیاد است قرارداد.

باماشین واندوگراف می‌توان‌پتانسیلی تاحدود ۱۰ میلیون ولت‌ایجادکرد. با استفاده ازاین پتانسیل می‌توان پرتوهائی‌ازیونهای پرانرژی ایجاد وبطرف لوله شتاب دهنده روانه‌کرد.

منبع یونی کــه مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارت است از یك لوله تخلیه که درون آن از گاز ئیدروژن، دوتریوم یاهلیوم پرشده است. انتخاب‌این گاز مربوط به آن است‌کــه بخواهیم از پروتون یا دوترون یا ذره آلفا برای بمباران اتمهای یك جسم استفاده کنیم. درپائین لوله شتاب دهنده، یك میدان مغناطیسی قوی قراردارد که امتدادش عمود برامتداد حرکت ذرات بارداراست و باعث تغییر مسیر آنها می‌شود.

تمام یونها، پس ازتغییرمسیربطرف روزنه‌ای هدایت می‌شوند و این روزنه یونهای هم انرژی را ازخودعبورمی‌دهد. یونهائی‌که انرژی‌آنها با هم برابراست پس ازعبور ازروزنه ازطریق لوله پرتاب کننده بطرف هدف مورد نظرپرتاب می‌شوند.

علاوه برواندوگراف شتاب دهنده‌های دیگری بنامهای سیکلوترون و سینکروترون ساخته شده است. دراین شتاب دهنده‌ها ازیك میدان الکتریکی متناوب و یك میدان مغناطیسی فوق‌العاده قوی که عمود بر میدان الکتریکی است استفاده می‌شود؛ درنتیجه‌مسیر ذرات باردار دراین‌شتاب‌دهنده‌ها مارپیچی یادایره‌ای شکل است (درسینکروترون مسیر ذرات دایره‌ای و در سیکلوترون مارپیچی است.)



شکل۱۸-۱۰- دراین‌تصویرهسته اورانیوم بدوهسته ناپایدار وچهار نوترون وچهار پرتو γ ویك ذره α تبدیل‌شده‌است.

۱- Freon CF_2Cl_2

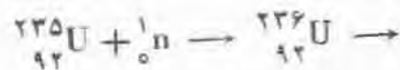
پرسش ۱۸-۱۱- واحد انرژی درفیزیك اتمی چیست ؟

پرسش ۱۸-۱۲- آیا صدور پرتو گاما ازهسته عنصر رادیواکتیو هم یك نوع تلاشی هسته عنصر است ؟

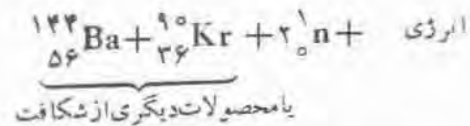
شکافت هسته[1]

بطوری‌که گفته شد وقتی نوترونها با سرعت زیاد به هسته سنگین اتمها برخورد کنند انرژی‌جنبشی نوترونها باعث ناپایداری هسته می گردد و آنها را به دو یا چند هسته کوچکتر تبدیل می کند (مانند قطره آبی‌که در اثر یك ضربه تقسیم می‌شود) . این عمل تقسیم هسته را شکافت هسته گویند.

برای نمونه شکافت هسته‌اورانیم ۲۳۵ را که تحت تأثیرنوترونهای سریع قراردارد می‌نویسیم:



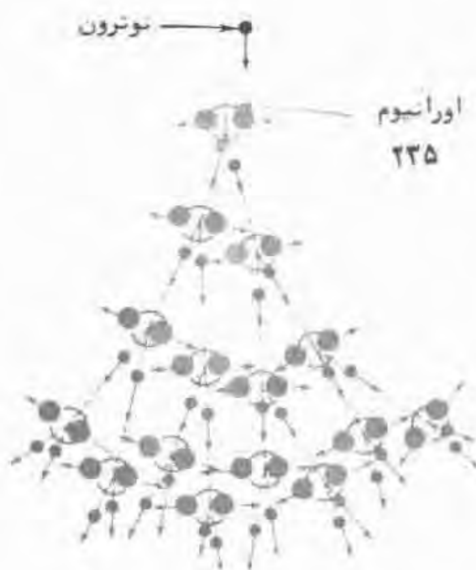
$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow$$



$$\underbrace{^{144}_{56}Ba + ^{90}_{36}Kr}_{\text{یامحصولات دیگری ازشکافت}} + 2\,^{1}_{0}n + \text{انرژی}$$

بطوری که رابطه بالا نشان می‌دهد به ازای هر نوترون دونوترون ایجاد می‌شود که این دونوترون می‌توانند دوهسته دیگر اورانیوم را بشکنند و تشکیل فعل وانفعال زنجیری بدهند (شکل ۱۸-۱۱) .

شرط آنکه این فعل‌وانفعال صورت گیرد این است که جرم اورانیوم ازمقدار معینی (جرم بحرانی) کمتر نباشد زیرا اگرازاین مقدار کمترباشدنوترون‌های حاصل از ماده شکافت‌پذیر خارج شده و عمل



شکل ۱۸-۱۱- تصویری از فعل‌وانفعال زنجیری در اورانیوم ۲۳۵

ادامه نمی‌یابد.

بـه طور خلاصه ، «جرم بحرانی» یك مـاده شکافت‌پذیر (مانند اورانیم ۲۳۵ یا پلوتونیم ۲۳۹) عبارتست از جرمی کـه در آن، میزان تولید نوترون برابر میزان به هدر رفتن نوترون باشد.

فعل و انفعال مزبور همیشه بـا مقدار زیادی انرژی همراه است. انرژی‌که در اثر این فعل‌وانفعال ظاهر می‌شود از تبدیل ماده بـه انرژی حاصل شده است، زیرا اگر با دقت مجموع جرم‌های طرف اول و طرف دوم رابطه بـالا را حساب کنیم ملاحظه می‌شود که در طرف دوم کاهش جرمی برابر Δm موجود است کـه این مقدار جرم به صورت انرژی ظاهر شده و اندازه انرژی حاصل از رابطه اینشتین

۱ـ Fission

یعنی $E=c^{۲}\Delta m$ بدست می‌آید که‌در آن c سرعت نور است.

جوش هسته‌ای[1]

در شکافت هسته، یك هسته سنگین به هسته‌های سبکتر تبدیل می‌شود درصورتیکه عمل جوش هسته‌ای عکس آن است ، بدین‌ترتیب که در عمل جوش‌چند هسته سبك به هسته سنگین‌تر تبدیل می‌شود. برای‌آنکه جوش هسته صورت گیرد باید هسته یك‌اتم باانرژی بسیار زیادی به هسته اتم دیگر برخورد کند و برای تأمین چنین انرژی به دمای بسیار زیاد(میلیون‌هادرجه) احتیاج است.

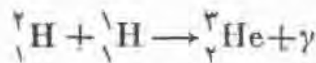
یکی از نمونه‌های جوش هسته‌ای ، پیوند هسته‌های ئیدروژن و تبدیل آن‌ها به هلیوم درخورشید است. دراین فعل‌وانفعال‌دائماً مقداری‌جرم به انرژی تبدیل می‌شود و سبب می‌گردد که خورشید با توان ۴×۱۰^{۲۳} کیلووات پیوسته انرژی به فضای اطراف صادرکند. فعل‌وانفعال به‌صورت زیر است:



$$ {}^{۱}_{۱}H + {}^{۱}_{۱}H \longrightarrow {}^{۲}_{۱}H + e^{+} + \nu $$

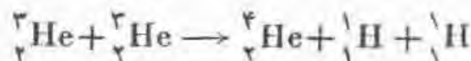
${}^{۲}_{۱}H$ ایزوتوپ ئیدروژن (دتریوم) و e^{+} پوزیترون[2] و ν نوترینو[3] می‌باشد.

از ترکیب ${}^{۲}_{۱}H$ با ئیدروژن معمولی خواهیم داشت :



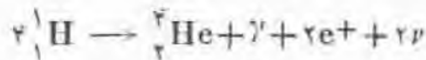
$$ {}^{۲}_{۱}H + {}^{۱}_{۱}H \longrightarrow {}^{۳}_{۲}He + \gamma $$

و از ترکیب دو ذره ایزوتوپ هلیوم $({}^{۳}_{۲}He)$ یك ذره هلیوم ${}^{۴}_{۲}He$ ودواتم ئیدروژن بدست می‌آید.



$$ {}^{۳}_{۲}He + {}^{۳}_{۲}He \longrightarrow {}^{۴}_{۲}He + {}^{۱}_{۱}H + {}^{۱}_{۱}H $$

می‌توان خلاصه فعل‌وانفعالات تبدیل ئیدروژن به‌هلیوم را به‌صورت زیر نوشت:



$$ ۴\,{}^{۱}_{۱}H \longrightarrow {}^{۴}_{۲}He + \gamma + ۲e^{+} + ۲\nu $$

یعنی چهار هسته اتم ئیدروژن در دمای بسیار زیاد به هسته هلیوم تبدیل می‌شود و در این تبدیل ۲۵/۷ MeV انرژی آزاد می‌گردد.

به این پرسشها پاسخ دهید

۱ــ چرا ذرات آلفا به وسیله اتمها پراکنده می‌شوند؟ چرا زاویه پراکندگی اغلب کوچك و گاهی بزرگ است؟

۲ــ چه فرق اساسی میان مدلهای اتمی تامسون و رادرفورد موجود است؟

۳ــ عدد اتمی ، طبق مدل هسته‌ای رادرفورد چه چیز را نشان می‌دهد؟

۱ــ Fusion

۲ــ Positron

۳ــ Neutrino ذره بنیادی خنثی می‌باشدکه جرم درحال سکون آن تقریباً صفر است.

۴ــ بزرگترین بار مثبتی که یك یون لیتیم (عنصری که بعد ازهلیوم قرار دارد) می‌تواند داشته باشد چقدر است؟

۵ــ به چه دلیل یك اتم می‌تواند فقط در حالتهای معینی از انرژی باشد؟

۶ــ استدلال بور درباره این‌که اتم فقط در حالات انرژی معینی وجود دارد، چه بود؟

۷ــ چرا تمام اتمهای ئیدروژن درحالت عادی ابعاد یکسان دارند؟

۸ــ چگونه براساس مدل بور خطوط طیف ئیدروژن توجیه می‌شود؟

۹ــ چگونه براساس مدل بور می‌توان خطوط جذبی طیف را توجیه‌کرد؟

۱۰ــ موفقیتها و نارسائیهای مدل بورچیست؟

۱۱ــ وقتی‌که یك هسته یك‌ذره α از خود صادرکند چه تغییری می‌یابد؟

۱۲ــ یك جسم رادیواکتیو در مدت ۱۶۸ ثانیه به $\frac{1}{8}$ جرم اول خود می‌رسد نیمه عمر آن چند ثانیه است؟

۱۳ــ منظور از سری اجسام رادیواکتیو چیست و چند سری تا بحال شناخته شده است؟

۱۴ــ اثر میدان الکتریکی بر ذرات α و β و γ چگونه است؟

۱۵ــ چه نیروئی باعث قرارگرفتن پروتونهای مثبت در هسته می‌شود؟ آن را شرح‌دهید.

۱۶ــ منظور از انرژی پیوندی چیست؟

۱۷ــ چه تفاوتی بین شکافت هسته‌ای و جوش هسته‌ای موجود است؟

۱۸ــ واندوگراف چیست؟ طرزکار آن چگونه است؟

۱۹ــ اهمیت نوترون از نظر شکافت هسته از چه نظر است؟

۲۰ــ تلاشی بتائی چیست و چه تغییری در اتم حاصل می‌شود؟

۲۱ــ یکی از واکنشهای هسته‌ای‌که منجر به تولید بتای مثبت (پوزیترون) می‌شوداستحاله رادیو فسفر ${}^{30}_{15}P$ بوسیلیسیم ${}^{30}_{14}Si$ است. فرمول این واکنش را بنویسید.

این مسئله‌ها را حل کنید

۱ــ یك ملکول‌گرم ئیدروژن حجمی برابر ۲۲٫۴ لیتر و تعداد ملکولی برابر: $N=6{,}02\times10^{23}$ دارد. با توجه به‌اندازه شعاع اتم ئیدروژن ($r=0{,}529\mathring{A}$) چه نسبتی از حجم‌گاز بوسیله اتمها اشغال شده است و چه نسبتی خالی از ماده می‌باشد؟

۲ــ مقداری ماده رادیواکتیو شامل 10^{10} اتم رادیــو اکتیو است اگر نیمه عمر آن یك

ساعت باشد چند اتم در مدت دو ساعت دچار تلاشی می‌شود؟

۳ــ در یك بمب هسته‌ای ۱۰ کیلوگرم از مـاده منفجره می‌تواند مقدار انرژی معادل یك میلیون تن T.N.T[1] تولیدکند اگر هرتن T.N.T در موقع انفجار $۴/۱۸ \times ۱۰^۹$ ژول انرژی تولیدکند، معین‌کنید چند گرم از این ماده منفجره به انرژی تبدیل شده است؟

۴ــ تعدادی اتم ئیدروژن بحالت تحریك درآمده و الکترون آنها روی مدارهائی بـا عدد کوانتم n قرارگرفته است اگر ۹ = n باشد شعاع مدار و سرعت الکترونها را در این حالت تحریك حساب‌کنید.

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۸

۱۸ــ۱)ــ بلی ، با افزایش شدت جریان ، میدان مغناطیسی قویتر شده و چوب‌پنبه‌ها به هم نزدیکتر و حلقه‌ها تنگتر می‌شوند و باکاهش شدت جریان چوب‌پنبه‌ها از هم بازتر می‌گردند.

۱۸ــ۲)ــ سرعت ذرات آلفا ، ضخامت ورقه فلزی و مقدار بارالکتریکی روی هر هسته ، و رادرفورد اثراین عوامل را ضمن **محاسبات** خود در نظرگرفت و همکاران او به مرحله آزمایش درآوردند.

۱۸ــ۳)ــ اتم درحالت عادی خنثی‌است. بنا براین بارمثبت هسته برابر بارمنفی‌الکترونهای دور هسته است. اگر بارمثبت هسته به‌صورت مضربی از بارالکتریکی الکترون معین باشد (یعنی $Q = Ze$) ، تعداد الکترونها به آسانی حساب می‌شود:

$$\text{(تعداد الکترونها)}\ Z = \frac{Q}{e}\ \ \frac{\text{بار هسته}}{\text{بار الکترون}}$$

۱۸ــ۴)ــ نتیجه مهمتر، تعیین Z (عدد اتمی) هرعنصراست‌که هم معرف تعداد الکترونهای دور هسته و هم معرف تعداد بارهای مثبت درون هسته می‌باشد. علاوه بـراین Z نمایانگر شماره خانه عنصر مربوط در جدول تناوبی عناصر (جدول مندلیف) است.

۱۸ــ۵)ــ با توجه به رابطه ۱۸ــ۳ و ثابت بودن مقادیر h و m و e و k ، اندازه‌شعاع هر مدار از رابطه :

$$r_n = \frac{n^2 r_0}{z} \quad (۱۰\text{ــ}۱۸)$$

به دست می‌آید. برای ئیدروژن ۱ = z است بنابـراین شعاع مدارهای دیگر به ترتیب $4r_0$ ، $9r_0$ ، $16r_0$ و ..... خواهد بود (شکل ۱۸ــ۱۲).

---

[1] ــ تری‌نیتروتولوئن



شکل ۱۸-۱۲- شعاع مدارهای مجاز اتم ئیدروژن و مقایسه آنها با هم در مدل بور.

۱۸-۶)- علت این است که طبق رابطه ۱۸-۷ انرژی الکترون با مجذور عدد کوانتومی n نسبت عکس دارد. هرچه n (که در واقع شماره تراز انرژی است) بزرگتر شود انرژی کمتر می‌شود و به‌ازاء مقادیر خیلی بزرگ n ، انرژیها به هم نزدیك می‌شوند و اختلاف آنها به‌سمت صفر میل می‌کند.

۱۸-۷)- رنگ هر یك از خطوط طیف تابع فرکانس آن است و فرکانس طبق رابطه $E_F - E_I = hf$ بستگی به‌اختلاف بین دو تراز انرژی ابتدائی و انتهائی الکترون در اتم دارد. مثلاً وقتی در گاز ئیدروژن تخلیه الکتریکی صورت می‌گیرد اتمهای این گاز در ترازهای مختلف انرژی قرار می‌گیرند و ضمن برگشت به‌تراز انرژی پائین‌تر، انرژی مکتسبه را به‌صورت پرتوهائی با فرکانسهای مجاز مختلف تابش می‌کنند که به‌شکل خطوط رنگی طیف ظاهر می‌شود.

۱۸-۸)- با مالش و حرارت دادن و روشن کردن اجسام ، برخورد ذرات سریع (مثلاً در گازها ضمن تخلیه الکتریکی) ، واکنش شیمیائی و جز اینها.

۱۸-۹)- بلی ، تمام الکترونهای اتم نیز ممکن است از آن خارج شوند ولی اگر تعداد الکترونها در اتم زیاد باشد ، یونیزاسیون کامل چنین اتمهائی به انرژی بیشتری نیاز دارد.

۱۸-۱۰)- نیمه عمر هرعنصر رادیواکتیو زمانی است که در آن زمان فقط نصف اتمهای رادیواکتیو موجود در آن عنصر متلاشی می‌شوند.

۱۸-۱۱)- واحد انرژی در فیزیك اتمی الکترون‌ولت است. الکترون ولت مقدار انرژی است که یك الکترون بین دو نقطه که اختلاف پتانسیل آن یك ولت است بدست می‌آورد.

$$۱eV = ۱/۶۰۲ \times ۱۰^{-۱۹} j$$

۱۸-۱۲)- نـه ، زیرا پرتو گاما از جنس فوتون و بدون جرم و بار الکتریکی است ، بنابراین عنصر دختر با عنصر مادر یکی است.

معمولاً صدور پرتو گاما از هسته بلافاصله به دنبال گسیل ذره آلفا یا بتا است و علت آن تحریك هسته و انتقال یکی از نوکلئونها از یك حالت انرژی به حالت دیگر می‌باشد.

نام یکاهای پایه این دستگاه بقرار زیر است:

الف : متر یکای درازا (طول)

ب : کیلوگرم « توده (جرم)

ج : ثانیه « زمان

د : آمپر[1] « شدت جریان الکتریسیته

ه : کلوین[2] « دما (درجه حرارت)

و : کاندلا[3] « شدت نور

ز : مل[4] « مقدار ماده

تعریف یکاهای پایه:

متر: درازائی است مساوی با ۱۶۵۰۷۶۳/۷۳ برابر طول موج در خلأ پرتو اتم کریپتون[5] ۸۶ که در انتقال بین دو تراز انرژی $2p_{10}$ و $5d_5$ ایجاد میشود.

کیلوگرم: توده استوانه‌ای است از آلیاژ پلاتین و ایریدیم[6] که در سال ۱۸۸۹ میلادی مطابق با ۱۲۶۸ هجری‌شمسی بعنوان نمونه اصلی کیلوگرم مورد قبول کنفرانس عمومی اوزان و مقیاسها واقع شده است و اکنون در دفتر بین‌المللی اوزان و مقیاسها واقع در شهرسور[7] فرانسه نگهداری میشود.

ثانیه: مدتی است مساوی ۹۱۹۲۶۳۱۷۷۰ برابر دوره تناوب پرتو مربوط به انتقال بین دو تراز بسیار ظریف (هیپرفن) وابسته بحالت بنیادی اتم سزیم[8] ۱۳۳.

آمپر: شدت جریان الکتریسیته ثابتی است که چون از دو هادی مستقیم متوازی بطول بسیار بلند و بسطح مقطع بسیار کوچك دایره‌ای شکل که در خلأ بفاصله یکمتر ازیکدیگر قرار گرفته باشندبگذرد نیروی الکترومغناطیسی که در نتیجه این جریان بین دو هادی ایجاد میشود برابر 2×10^{-7} نیوتن در هر متر در ازای آنها باشد.

یادآوری_ نیوتن یکای نیرو است و دریکاهای فرعی تعریف میشود.

کلوین: دمای ترمودینامیکی است برابر با $\frac{1}{273/16}$ دمای ترمودینامیکی نقطه سه‌گانه آب.

کلمه‌کلوین‌برای بیان اختلاف دما نیز بکار میرود. اختلاف دما برحسب زینه‌سلسیوس[9] نیز بیان میشود.

هر زینه سلسیوس برابر یك زینه‌کلوین و صفر زینه‌بندی سلسیوس مطابق ۲۷۳/۱۵ از زینه‌بندی ترمودینامیکی است.

کاندلا: شدت نوری است که از روزنه‌ای بمساحت $\frac{1}{600000}$ متر مربع در امتداد عمود بر سطح روزنه منتشرمیشود درصورتیکه این روزنه مانند تابنده کامل (جسم‌سیاه) در دمای انجماد پلاتین تابش کند.

مل (mol): یکای‌مقدار ماده است و عبارتست از جرم تعداد کل‌ذرات (اعم از ملکول، اتم، یون، پروتون، الکترون، نوترون...) موجود دریك سیستم که برابر تعداد اتمهای موجود در ۱۲ گرم کربن۱۲ (۱۲C) باشد.

۱_ Ampere ۲_ Kelvin ۳_ Candela
۴_ Mol ۵_ Krypton ۶_ Iridium
۷_ Sevre ۸_ Cesium ۹_ Celsius

جدول عنصرها

Atomic number Z	Symbol	Name	Atomic number Z	Symbol	Name
1	H	Hydrogen	54	Xe	Xenon
2	He	Helium	55	Cs	Caesium
3	Li	Lithium	56	Ba	Barium
4	Be	Beryllium	57	La	Lanthanum
5	B	Boron	58	Ce	Cerium
6	C	Carbon	59	Pr	Praseodymium
7	N	Nitrogen	60	Nd	Neodymium
8	O	Oxygen	61	Pm	Promethium
9	F	Fluorine	62	Sm	Samarium
10	Ne	Neon	63	Eu	Europium
11	Na	Sodium	64	Gd	Gadolinium
12	Mg	Magnesium	65	Tb	Terbium
13	Al	Aluminium	66	Dy	Dysprosium
14	Si	Silicon	67	Ho	Holmium
15	P	Phosphorus	68	Er	Erbium
16	S	Sulphur	69	Tm	Thulium
17	Cl	Chlorine	70	Yb	Ytterbium
18	A	Argon	71	Lu	Lutetium
19	K	Potassium	72	Hf	Hafnium
20	Ca	Calcium	73	Ta	Tantalum
21	Sc	Scandium	74	W	Tungsten
22	Ti	Titanium	75	Re	Rhenium
23	V	Vanadium	76	Os	Osmium
24	Cr	Chromium	77	Ir	Iridium
25	Mm	Manganese	78	Pt	Platinum
26	Fe	Iron	79	Au	Gold
27	Co	Cobalt	80	Hg	Mercury
28	Ni	Nickel	81	Tl	Thallium
29	Cu	Copper	82	Pb	Lead
30	Zn	Zinc	83	Bi	Bismuth
31	Ga	Gallium	84	Po	Polonium
32	Ge	Germanium	85	At	*Astatine*
33	As	Arsenic	86	Rn	Radon
34	Se	Selenium	87	Fr	*Francium*
35	Br	Bromine	88	Ra	Radium
36	Kr	Krypton	89	Ac	Actinium
37	Rb	Rubidium	90	Th	Thorium
38	Sr	Strontium	91	Pa	Protactinium
39	Y	Yttrium	92	U	Uranium
40	Zr	Zirconium	93	Np	*Neptunium*
41	Nb	Niobium	94	Pu	*Plutonium*
42	Mo	Molybdenum	95	Am	*Americium*
43	Tc	*Technetium*	96	Cm	*Curium*
44	Ru	Ruthenium	97	Bk	*Berkelium*
45	Rh	Rhodium	98	Cf	*Californium*
46	Pd	Palladium	99	E	*Einsteinium*
47	Ag	Silver	100	Fm	*Fermium*
48	Cd	Cadmium	101	Mv	*Mendelevium*
49	In	Indium	102	No	*Nobelium*
50	Sn	Tin	103	Lw	*Lawrencium*
51	Sb	Antimony	104	Ku	*Kurchatovium*
52	Te	Tellurium	105	Ha	*Hahnium*
53	I	Iodine			

عناصری‌که‌با حروف ایتالیک نوشته شده‌اند درطبیعت یافت نمی‌شوند و به طورمصنوعی تهیه می گردند .

جدول سینوسها، کسینوسها و تانژانتها

زاویه	سینوس	کسینوس	تانژانت	زاویه	سینوس	کسینوس	تانژانت
0°	0.000	1.000	0.000	45°	0.707	0.707	1.000
1	0.017	1.000	0.017	46	0.719	0.695	1.036
2	0.035	0.999	0.035	47	0.731	0.682	1.072
3	0.052	0.999	0.052	48	0.743	0.669	1.111
4	0.070	0.998	0.070	49	0.755	0.656	1.150
5	0.087	0.996	0.087	50	0.766	0.643	1.192
6	0.105	0.995	0.105	51	0.777	0.629	1.235
7	0.122	0.993	0.123	52	0.788	0.616	1.280
8	0.139	0.990	0.141	53	0.799	0.602	1.327
9	0.156	0.988	0.158	54	0.809	0.588	1.376
10	0.174	0.985	0.176	55	0.819	0.574	1.428
11	0.191	0.982	0.194	56	0.829	0.559	1.483
12	0.208	0.978	0.213	57	0.839	0.545	1.540
13	0.225	0.974	0.231	58	0.848	0.530	1.600
14	0.242	0.970	0.249	59	0.857	0.515	1.664
15	0.259	0.966	0.268	60	0.866	0.500	1.732
16	0.276	0.961	0.287	61	0.875	0.485	1.804
17	0.292	0.956	0.306	62	0.883	0.469	1.881
18	0.309	0.951	0.325	63	0.891	0.454	1.963
19	0.326	0.946	0.344	64	0.899	0.438	2.050
20	0.342	0.940	0.364	65	0.906	0.423	2.145
21	0.358	0.934	0.384	66	0.914	0.407	2.246
22	0.375	0.927	0.404	67	0.921	0.391	2.356
23	0.391	0.921	0.424	68	0.927	0.375	2.475
24	0.407	0.914	0.445	69	0.934	0.358	2.605
25	0.423	0.906	0.466	70	0.940	0.342	2.747
26	0.438	0.899	0.488	71	0.946	0.326	2.904
27	0.454	0.891	0.510	72	0.951	0.309	3.078
28	0.469	0.883	0.532	73	0.956	0.292	3.271
29	0.485	0.875	0.554	74	0.961	0.276	3.487
30	0.500	0.866	0.577	75	0.966	0.259	3.732
31	0.515	0.857	0.601	76	0.970	0.242	4.011
32	0.530	0.848	0.625	77	0.974	0.225	4.331
33	0.545	0.839	0.649	78	0.978	0.208	4.705
34	0.559	0.829	0.675	79	0.982	0.191	5.145
35	0.574	0.819	0.700	80	0.985	0.174	5.671
36	0.588	0.809	0.727	81	0.988	0.156	6.314
37	0.602	0.799	0.754	82	0.990	0.139	7.115
38	0.616	0.788	0.781	83	0.993	0.122	8.144
39	0.629	0.777	0.810	84	0.995	0.105	9.514
40	0.643	0.766	0.839	85	0.996	0.087	11.43
41	0.656	0.755	0.869	86	0.998	0.070	14.30
42	0.669	0.743	0.900	87	0.999	0.052	19.08
43	0.682	0.731	0.933	88	0.999	0.035	28.64
44	0.695	0.719	0.966	89	1.000	0.017	57.29
45	0.707	0.707	1.000	90	1.000	0.000	

جدول لگاریتم اعشاری

N	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	D
۱۰	۰۰۰۰	۰۰۴۳	۰۰۸۶	۰۱۲۸	۰۱۷۰	۰۲۱۲	۰۲۵۳	۰۲۹۴	۰۳۳۴	۰۳۷۴	۴۰
۱۱	۰۴۱۴	۰۴۵۳	۰۴۹۲	۰۵۳۱	۰۵۶۹	۰۶۰۷	۰۶۴۵	۰۶۸۲	۰۷۱۹	۰۷۵۵	۳۷
۱۲	۰۷۹۲	۰۸۲۸	۰۸۶۴	۰۸۹۹	۰۹۳۴	۰۹۶۹	۱۰۰۴	۱۰۳۸	۱۰۷۲	۱۱۰۶	۳۴
۱۳	۱۱۳۹	۱۱۷۳	۱۲۰۶	۱۲۳۹	۱۲۷۱	۱۳۰۳	۱۳۳۵	۱۳۶۷	۱۳۹۹	۱۴۳۰	۳۲
۱۴	۱۴۶۱	۱۴۹۲	۱۵۲۳	۱۵۵۳	۱۵۸۴	۱۶۱۴	۱۶۴۴	۱۶۷۳	۱۷۰۳	۱۷۳۲	۲۹
۱۵	۱۷۶۱	۱۷۹۰	۱۸۱۸	۱۸۴۷	۱۸۷۵	۱۹۰۳	۱۹۳۱	۱۹۵۹	۱۹۸۷	۲۰۱۴	۲۸
۱۶	۲۰۴۱	۲۰۶۸	۲۰۹۵	۲۱۲۲	۲۱۴۸	۲۱۷۵	۲۲۰۱	۲۲۲۷	۲۲۵۳	۲۲۷۹	۲۶
۱۷	۲۳۰۴	۲۳۳۰	۲۳۵۵	۲۳۸۰	۲۴۰۵	۲۴۳۰	۲۴۵۵	۲۴۸۰	۲۵۰۴	۲۵۲۸	۲۵
۱۸	۲۵۵۳	۲۵۷۷	۲۶۰۱	۲۶۲۴	۲۶۴۸	۲۶۷۲	۲۶۹۵	۲۷۱۸	۲۷۴۲	۲۷۶۵	۲۳
۱۹	۲۷۸۷	۲۸۱۰	۲۸۳۳	۲۸۵۶	۲۸۷۸	۲۹۰۰	۲۹۲۳	۲۹۴۵	۲۹۶۷	۲۹۸۸	۲۲
۲۰	۳۰۱۰	۳۰۳۲	۳۰۵۳	۳۰۷۵	۳۰۹۶	۳۱۱۷	۳۱۳۹	۳۱۶۰	۳۱۸۱	۳۲۰۱	۲۱
۲۱	۳۲۲۲	۳۲۴۳	۳۲۶۳	۳۲۸۴	۳۳۰۴	۳۳۲۴	۳۳۴۴	۳۳۶۵	۳۳۸۵	۳۴۰۴	۲۰
۲۲	۳۴۲۴	۳۴۴۴	۳۴۶۴	۳۴۸۳	۳۵۰۲	۳۵۲۲	۳۵۴۱	۳۵۶۰	۳۵۷۹	۳۵۹۸	۱۹
۲۳	۳۶۱۷	۳۶۳۶	۳۶۵۵	۳۶۷۴	۳۶۹۲	۳۷۱۱	۳۷۲۹	۳۷۴۷	۳۷۶۶	۳۷۸۳	۱۸
۲۴	۳۸۰۲	۳۸۲۰	۳۸۳۸	۳۸۵۶	۳۸۷۴	۳۸۹۲	۳۹۰۹	۳۹۲۷	۳۹۴۴	۳۹۶۲	۱۸
۲۵	۳۹۷۹	۳۹۹۷	۴۰۱۴	۴۰۳۱	۴۰۴۸	۴۰۶۵	۴۰۸۲	۴۰۹۹	۴۱۱۶	۴۱۳۳	۱۷
۲۶	۴۱۵۰	۴۱۶۶	۴۱۸۳	۴۲۰۰	۴۲۱۶	۴۲۳۲	۴۲۴۹	۴۲۶۵	۴۲۸۱	۴۲۹۷	۱۶
۲۷	۴۳۱۴	۴۳۳۰	۴۳۴۶	۴۳۶۲	۴۳۷۷	۴۳۹۳	۴۴۰۹	۴۴۲۵	۴۴۴۰	۴۴۵۶	۱۶
۲۸	۴۴۷۲	۴۴۸۷	۴۵۰۲	۴۵۱۸	۴۵۳۳	۴۵۴۸	۴۵۶۴	۴۵۷۹	۴۵۹۴	۴۶۰۹	۱۵
۲۹	۴۶۲۴	۴۶۳۹	۴۶۵۴	۴۶۶۹	۴۶۸۳	۴۶۹۸	۴۷۱۳	۴۷۲۸	۴۷۴۲	۴۷۵۷	۱۵
۳۰	۴۷۷۱	۴۷۸۶	۴۸۰۰	۴۸۱۴	۴۸۲۹	۴۸۴۳	۴۸۵۷	۴۸۷۱	۴۸۸۵	۴۹۰۰	۱۴
۳۱	۴۹۱۴	۴۹۲۸	۴۹۴۱	۴۹۵۵	۴۹۶۹	۴۹۸۳	۴۹۹۷	۵۰۱۱	۵۰۲۴	۵۰۳۸	۱۴
۳۲	۵۰۵۱	۵۰۶۵	۵۰۷۹	۵۰۹۲	۵۱۰۵	۵۱۱۹	۵۱۳۲	۵۱۴۵	۵۱۵۹	۵۱۷۲	۱۳
۳۳	۵۱۸۵	۵۱۹۸	۵۲۱۱	۵۲۲۴	۵۲۳۷	۵۲۵۰	۵۲۶۳	۵۲۷۶	۵۲۸۹	۵۳۰۲	۱۳
۳۴	۵۳۱۵	۵۳۲۷	۵۳۴۰	۵۳۵۳	۵۳۶۶	۵۳۷۸	۵۳۹۱	۵۴۰۳	۵۴۱۶	۵۴۲۸	۱۳
۳۵	۵۴۴۱	۵۴۵۳	۵۴۶۵	۵۴۷۸	۵۴۹۰	۵۵۰۲	۵۵۱۴	۵۵۲۷	۵۵۳۹	۵۵۵۱	۱۲
۳۶	۵۵۶۳	۵۵۷۵	۵۵۸۷	۵۵۹۹	۵۶۱۱	۵۶۲۳	۵۶۳۵	۵۶۴۷	۵۶۵۸	۵۶۷۰	۱۲
۳۷	۵۶۸۲	۵۶۹۴	۵۷۰۵	۵۷۱۷	۵۷۲۹	۵۷۴۰	۵۷۵۲	۵۷۶۳	۵۷۷۵	۵۷۸۶	۱۲
۳۸	۵۷۹۸	۵۸۰۹	۵۸۲۱	۵۸۳۲	۵۸۴۳	۵۸۵۵	۵۸۶۶	۵۸۷۷	۵۸۸۸	۵۸۹۹	۱۱
۳۹	۵۹۱۱	۵۹۲۲	۵۹۳۳	۵۹۴۴	۵۹۵۵	۵۹۶۶	۵۹۷۷	۵۹۸۸	۵۹۹۹	۶۰۱۰	۱۱
۴۰	۶۰۲۱	۶۰۳۱	۶۰۴۲	۶۰۵۳	۶۰۶۴	۶۰۷۵	۶۰۸۵	۶۰۹۶	۶۱۰۷	۶۱۱۷	۱۱
۴۱	۶۱۲۸	۶۱۳۸	۶۱۴۹	۶۱۵۹	۶۱۷۰	۶۱۸۰	۶۱۹۱	۶۲۰۱	۶۲۱۲	۶۲۲۲	۱۰
۴۲	۶۲۳۲	۶۲۴۳	۶۲۵۳	۶۲۶۳	۶۲۷۴	۶۲۸۴	۶۲۹۴	۶۳۰۴	۶۳۱۴	۶۳۲۵	۱۰
۴۳	۶۳۳۵	۶۳۴۵	۶۳۵۵	۶۳۶۵	۶۳۷۵	۶۳۸۵	۶۳۹۵	۶۴۰۵	۶۴۱۵	۶۴۲۵	۱۰
۴۴	۶۴۳۵	۶۴۴۴	۶۴۵۴	۶۴۶۴	۶۴۷۴	۶۴۸۴	۶۴۹۳	۶۵۰۳	۶۵۱۳	۶۵۲۲	۱۰
۴۵	۶۵۳۲	۶۵۴۲	۶۵۵۱	۶۵۶۱	۶۵۷۱	۶۵۸۰	۶۵۹۰	۶۵۹۹	۶۶۰۹	۶۶۱۸	۱۰
۴۶	۶۶۲۸	۶۶۳۷	۶۶۴۶	۶۶۵۶	۶۶۶۵	۶۶۷۵	۶۶۸۴	۶۶۹۳	۶۷۰۲	۶۷۱۲	۹
۴۷	۶۷۲۱	۶۷۳۰	۶۷۳۹	۶۷۴۹	۶۷۵۸	۶۷۶۷	۶۷۷۶	۶۷۸۵	۶۷۹۴	۶۸۰۳	۹
۴۸	۶۸۱۲	۶۸۲۱	۶۸۳۰	۶۸۳۹	۶۸۴۸	۶۸۵۷	۶۸۶۶	۶۸۷۵	۶۸۸۴	۶۸۹۳	۹
۴۹	۶۹۰۲	۶۹۱۱	۶۹۲۰	۶۹۲۸	۶۹۳۷	۶۹۴۶	۶۹۵۵	۶۹۶۴	۶۹۷۲	۶۹۸۱	۹
۵۰	۶۹۹۰	۶۹۹۸	۷۰۰۷	۷۰۱۶	۷۰۲۴	۷۰۳۳	۷۰۴۲	۷۰۵۰	۷۰۵۹	۷۰۶۷	۹
۵۱	۷۰۷۶	۷۰۸۴	۷۰۹۳	۷۱۰۱	۷۱۱۰	۷۱۱۸	۷۱۲۶	۷۱۳۵	۷۱۴۳	۷۱۵۲	۸
۵۲	۷۱۶۰	۷۱۶۸	۷۱۷۷	۷۱۸۵	۷۱۹۳	۷۲۰۲	۷۲۱۰	۷۲۱۸	۷۲۲۶	۷۲۳۵	۸

N	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	D
۵۵	۷۴۰۴	۷۴۱۱	۷۴۱۹	۷۴۲۷	۷۴۳۵	۷۴۴۳	۷۴۵۱	۷۴۵۹	۷۴۶۶	۷۴۷۴	۸
۵۶	۷۴۸۲	۷۴۹۰	۷۴۹۷	۷۵۰۵	۷۵۱۳	۷۵۲۰	۷۵۲۸	۷۵۳۶	۷۵۴۳	۷۵۵۱	۸
۵۷	۷۵۵۹	۷۵۶۶	۷۵۷۴	۷۵۸۱	۷۵۸۹	۷۵۹۷	۷۶۰۴	۷۶۱۲	۷۶۱۹	۷۶۲۷	۸
۵۸	۷۶۳۴	۷۶۴۲	۷۶۴۹	۷۶۵۷	۷۶۶۴	۷۶۷۲	۷۶۷۹	۷۶۸۶	۷۶۹۴	۷۷۰۱	۷
۵۹	۷۷۰۸	۷۷۱۶	۷۷۲۳	۷۷۳۰	۷۷۳۸	۷۷۴۵	۷۷۵۲	۷۷۶۰	۷۷۶۷	۷۷۷۴	۷
۶۰	۷۷۸۱	۷۷۸۹	۷۷۹۶	۷۸۰۳	۷۸۱۰	۷۸۱۸	۷۸۲۵	۷۸۳۲	۷۸۳۹	۷۸۴۶	۷
۶۱	۷۸۵۳	۷۸۶۰	۷۸۶۷	۷۸۷۵	۷۸۸۲	۷۸۸۹	۷۸۹۶	۷۹۰۳	۷۹۱۰	۷۹۱۷	۷
۶۲	۷۹۲۴	۷۹۳۱	۷۹۳۸	۷۹۴۵	۷۹۵۲	۷۹۵۹	۷۹۶۶	۷۹۷۳	۷۹۸۰	۷۹۸۶	۷
۶۳	۷۹۹۳	۸۰۰۰	۸۰۰۷	۸۰۱۴	۸۰۲۱	۸۰۲۸	۸۰۳۵	۸۰۴۱	۸۰۴۸	۸۰۵۵	۷
۶۴	۸۰۶۲	۸۰۶۹	۸۰۷۵	۸۰۸۲	۸۰۸۹	۸۰۹۶	۸۱۰۲	۸۱۰۹	۸۱۱۶	۸۱۲۲	۷
۶۵	۸۱۲۹	۸۱۳۶	۸۱۴۲	۸۱۴۹	۸۱۵۶	۸۱۶۲	۸۱۶۹	۸۱۷۶	۸۱۸۲	۸۱۸۹	۷
۶۶	۸۱۹۵	۸۲۰۲	۸۲۰۹	۸۲۱۵	۸۲۲۲	۸۲۲۸	۸۲۳۵	۸۲۴۱	۸۲۴۸	۸۲۵۴	۷
۶۷	۸۲۶۱	۸۲۶۷	۸۲۷۴	۸۲۸۰	۸۲۸۷	۸۲۹۳	۸۲۹۹	۸۳۰۶	۸۳۱۲	۸۳۱۹	۶
۶۸	۸۳۲۵	۸۳۳۱	۸۳۳۸	۸۳۴۴	۸۳۵۱	۸۳۵۷	۸۳۶۳	۸۳۷۰	۸۳۷۶	۸۳۸۲	۶
۶۹	۸۳۸۸	۸۳۹۵	۸۴۰۱	۸۴۰۷	۸۴۱۴	۸۴۲۰	۸۴۲۶	۸۴۳۲	۸۴۳۹	۸۴۴۵	۶
۷۰	۸۴۵۱	۸۴۵۷	۸۴۶۳	۸۴۷۰	۸۴۷۶	۸۴۸۲	۸۴۸۸	۸۴۹۴	۸۵۰۰	۸۵۰۶	۶
۷۱	۸۵۱۳	۸۵۱۹	۸۵۲۵	۸۵۳۱	۸۵۳۷	۸۵۴۳	۸۵۴۹	۸۵۵۵	۸۵۶۱	۸۵۶۷	۶
۷۲	۸۵۷۳	۸۵۷۹	۸۵۸۵	۸۵۹	۸۵۹۷	۸۶۰۳	۸۶۰۹	۸۶۱۵	۸۶۲۱	۸۶۲۷	۶
۷۳	۸۶۳۳	۸۶۳۹	۸۶۴۵	۸۶۵۱	۸۶۵۷	۸۶۶۳	۸۶۶۹	۸۶۷۵	۸۶۸۱	۸۶۸۶	۶
۷۴	۸۶۹۲	۸۶۹۸	۸۷۰۴	۸۷۱۰	۸۷۱۶	۸۷۲۲	۸۷۲۷	۸۷۳۳	۸۷۳۹	۸۷۴۵	۶
۷۵	۸۷۵۱	۸۷۵۶	۸۷۶۲	۸۷۶۸	۸۷۷۴	۸۷۷۹	۸۷۸۵	۸۷۹۱	۸۷۹۷	۸۸۰۲	۶
۷۶	۸۸۰۸	۸۸۱۴	۸۸۱۹	۸۸۲۵	۸۸۳۱	۸۸۳۷	۸۸۴۲	۸۸۴۸	۸۸۵۴	۸۸۵۹	۶
۷۷	۸۸۶۵	۸۸۷۰	۸۸۷۶	۸۸۸۲	۸۸۸۷	۸۸۹۳	۸۸۹۹	۸۹۰۴	۸۹۱۰	۸۹۱۵	۶
۷۸	۸۹۲۱	۸۹۲۶	۸۹۳۲	۸۹۳۸	۸۹۴۳	۸۹۴۹	۸۹۵۴	۸۹۶۰	۸۹۶۵	۸۹۷۱	۶
۷۹	۸۹۷۶	۸۹۸۲	۸۹۸۷	۸۹۹۳	۸۹۹۸	۹۰۰۴	۹۰۰۹	۹۰۱۵	۹۰۲۰	۹۰۲۵	۶
۸۰	۹۰۳۱	۹۰۳۶	۹۰۴۲	۹۰۴۷	۹۰۵۳	۹۰۵۸	۹۰۶۳	۹۰۶۹	۹۰۷۴	۹۰۷۹	۵
۸۱	۹۰۸۵	۹۰۹۰	۹۰۹۶	۹۱۰۱	۹۱۰۶	۹۱۱۲	۹۱۱۷	۹۱۲۲	۹۱۲۷	۹۱۳۳	۵
۸۲	۹۱۳۸	۹۱۴۳	۹۱۴۹	۹۱۵۴	۹۱۵۹	۹۱۶۴	۹۱۷۰	۹۱۷۵	۹۱۸۰	۹۱۸۵	۵
۸۳	۹۱۹۱	۹۱۹۶	۹۲۰۱	۹۲۰۶	۹۲۱۲	۹۲۱۷	۹۲۲۲	۹۲۲۷	۹۲۳۲	۹۲۳۸	۵
۸۴	۹۲۴۳	۹۲۴۸	۹۲۵۳	۹۲۵۸	۹۲۶۳	۹۲۶۹	۹۲۷۴	۹۲۷۹	۹۲۸۴	۹۲۸۹	۵
۸۵	۹۲۹۴	۹۲۹۹	۹۳۰۴	۹۳۰۹	۹۳۱۵	۹۳۲۰	۹۳۲۵	۹۳۳۰	۹۳۳۵	۹۳۴۰	۵
۸۶	۹۳۴۵	۹۳۵۰	۹۳۵۵	۹۳۶۰	۹۳۶۵	۹۳۷۰	۹۳۷۵	۹۳۸۰	۹۳۸۵	۹۳۹۰	۵
۸۷	۹۳۹۵	۹۴۰۰	۹۴۰۵	۹۴۱۰	۹۴۱۵	۹۴۲۰	۹۴۲۵	۹۴۳۰	۹۴۳۵	۹۴۴۰	۵
۸۸	۹۴۴۵	۹۴۵۰	۹۴۵۵	۹۴۶۰	۹۴۶۵	۹۴۶۹	۹۴۷۴	۹۴۷۹	۹۴۸۴	۹۴۸۹	۵
۸۹	۹۴۹۴	۹۴۹۹	۹۵۰۴	۹۵۰۹	۹۵۱۳	۹۵۱۸	۹۵۲۳	۹۵۲۸	۹۵۳۳	۹۵۳۸	۵
۹۰	۹۵۴۲	۹۵۴۷	۹۵۵۲	۹۵۵۷	۹۵۶۲	۹۵۶۶	۹۵۷۱	۹۵۷۶	۹۵۸۱	۹۵۸۶	۵
۹۱	۹۵۹۰	۹۵۹۵	۹۶۰۰	۹۶۰۵	۹۶۰۹	۹۶۱۴	۹۶۱۹	۹۶۲۴	۹۶۲۸	۹۶۳۳	۵
۹۲	۹۶۳۸	۹۶۴۳	۹۶۴۷	۹۶۵۲	۹۶۵۷	۹۶۶۱	۹۶۶۶	۹۶۷۱	۹۶۷۵	۹۶۸۰	۵
۹۳	۹۶۸۵	۹۶۸۹	۹۶۹۴	۹۶۹۹	۹۷۰۳	۹۷۰۸	۹۷۱۳	۹۷۱۷	۹۷۲۲	۹۷۲۷	۵
۹۴	۹۷۳۱	۹۷۳۶	۹۷۴۰	۹۷۴۵	۹۷۵۰	۹۷۵۴	۹۷۵۹	۹۷۶۳	۹۷۶۸	۹۷۷۳	۵
۹۵	۹۷۷۷	۹۷۸۲	۹۷۸۶	۹۷۹۱	۹۷۹۵	۹۸۰۰	۹۸۰۵	۹۸۰۹	۹۸۱۴	۸۱۸	۵
۹۶	۹۸۲۳	۹۸۲۷	۹۸۳۲	۹۸۳۶	۹۸۴۱	۹۸۴۵	۹۸۵۰	۹۸۵۴	۹۸۵۹	۹۸۶۳	۵
۹۷	۹۸۶۸	۹۸۷۲	۹۸۷۷	۹۸۸۱	۹۸۸۶	۹۸۹۰	۹۸۹۴	۹۸۹۹	۹۹۰۳	۹۹۰۸	۴
۹۸	۹۹۱۲	۹۹۱۷	۹۹۲۱	۹۹۲۶	۹۹۳۰	۹۹۳۴	۹۹۳۹	۹۹۴۳	۹۹۴۸	۹۹۵۲	۴

منابعی که در تدوین این کتاب به‌آنها مراجعه شده است

1) Contemporary Physics, Fred W. Inman and Carl E. Miller
2) A Contemporary View of Elementary Physics, Borowitz and Bornstein
3) Modern College Physics, Harvey e. White
4) Physics, Irwin Genzer, Philip Youngner
5) Project Physics, Text and Hand books
6) Physics Taffel
7) The Science of Physics, Arthur Beiser
8) Mechanics, Volume 1 Berkeley Physics Course
9) Physique, Terminale C. J. Sessac, G. Treherne
10) Electricité, et Magnétique, P. Fleury et J. P. Mathieu
11) Mécanique, P. Fleury et J. P. Mathieu
12) Image Optique, P. Fleury et J. P. Mathieu



